CARLOS ROBERTO REGATTIERI

**QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM
ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos,
da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Doutor em Engenharia
Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Josmar Davilson Pagliuso

SÃO CARLOS, SP
2009

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE
TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

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

R333q Regattieri, Carlos Roberto
 Quantificação da emissão de biogás em aterro sanitário
 : estudo de caso do aterro sanitário de São Carlos /
 Carlos Roberto Regattieri ; orientador Josmar Davilson
 Pagliuso. -- São Carlos, 2009.

 Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação em
 Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Térmica e
 Fluidos) --Escola de Engenharia de São Carlos da
 Universidade de São Paulo, 2009.

 1. Aterro de resíduos sólidos urbanos. 3. Emissões de
 biogás. 4. Fluxo de gases. I. Título.

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro CARLOS ROBERTO REGATTIERI

Tese defendida e julgada em 16/10/2009 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **JOSMAR DAVILSON PAGLIUSO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

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

APROVADO

Dr.ª. **PAULA CRISTINA GARCIA MANOEL CRNKOVIC**
(Pos-doutoranda/FAPESP)

Aprovado

Prof. Dr. **WAGNER LUIZ POLITO**
(Instituto de Química de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof.ª. Dr.ª. **ENY MARIA VIEIRA**
(Instituto de Química de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

EESCUSP
Serviço de Pós-Graduação
Protocolado em 16/10/2009

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Dedico

A minha esposa Silvia e aos meus filhos

Rafael e Felipe

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por permitir mais esta conquista, pela força atribuída, e pelas pessoas que colocou em meu caminho;

Ao Prof. Dr. Josmar D. Pagliuso, pelos ensinamentos, pela dedicação, e por acreditar nesta pesquisa;

Ao meus pais, Mazinho e Lúcia, minha irmã Maristela, meu sobrinho Arthur, e meus sogros Norberto e Magdalena, por acreditarem nesta minha realização;

Ao pessoal do Netef, pelos momentos que passamos juntos, e em especial ao amigo Hélio que não mediu esforços nos trabalhos realizados;

A Paula Crnkovic e Ivonete Ávila pela contribuição que trouxeram a esta pesquisa;

A Elizabeth Sikar e o Prof. Dr. Bohdan Matvienko pelos ensinamentos a mim transmitidos;

A Paula da Secretaria da Pós graduação pela paciência e pelo pronto atendimento;

Ao Engenheiro Douglas Comparotto Minamisako – Chefe da Divisão de Gestão de Resíduos Sólidos pelas informações prestadas;

A Fabiana Serralha pela contribuição desta pesquisa

A Helena da Biblioteca Centras do Campus da USP – SC pela contribuição;

Ao amigo Sérgio A. Calzavara pelo empréstimo do GPS;

Ao Centro Paula Souza pelo afastamento de minhas funções para a realização desta pesquisa;

Ao CNPq, pelo apoio financeiro

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

**“...O LOUVOR, E A GLÓRIA, E A SABEDORIA, E
AS AÇÕES DE GRAÇAS, E A HONRA, E O
PODER, E A FORÇA SEJAM AO NOSSO DEUS,
PELOS SÉCULOS DOS SÉCULOS.”
APOCALIPSE 5,12**

RESUMO

REGATTIERI, C.R. **Quantificação da Emissão de Biogás em Aterros Sanitário – Estudo de Caso do Aterro Sanitário de São Carlos**. 2009. 137 f Tese (Doutorado) – EESC – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

Este trabalho foi realizado junto ao NETeF – Núcleo de Engenharia Térmica e Fluídos da EESC/USP e ao Aterro Sanitário de São Carlos – Fazenda Guaporé, e teve como objetivo a quantificação da emissão de biogás através da superfície do aterro sanitário. Desenvolveu-se experimentalmente uma placa de fluxo, para a captura do biogás através da superfície do aterro em pontos distintos, levando-se em consideração a idade do lixo depositado e as diferentes camadas do aterro sanitário. As medidas foram realizadas de duas maneiras, sendo a primeira através de um aparelho de leitura que possui um princípio de detecção do CH_4 e do CO_2 por célula dupla de comprimento de onda por infravermelho com material de referência – GEM 2000, e posteriormente foram utilizadas ampolas gasométricas fabricadas pela Construmaq – São Carlos, que após a captura foram levadas para análise cromatográfica para detecção das porcentagens de CH_4 e do CO_2 . Estas medidas foram realizadas com uma sazonalidade de um ano. Para uma localização de emissão global, as medidas foram localizadas através de coordenadas geográficas. Os cálculos matemáticos envolveram equações de vazão e também uma projeção do tempo de produção do biogás. Observou-se que as emissões são significativas e que medidas simples de operações em aterros sanitários seriam eficazes. Os valores encontrados das emissões mensuradas de CH_4 em 2008 foram de $1.741,41 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{ano}$, e em 2009 foram de $3.315,88 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{ano}$, e as emissões mensuradas de CO_2 em 2008 foram de $16.915,85 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{ano}$, e em Julho de 2009 foram de $27.601,30 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{ano}$.

Palavras-chaves: Aterro de resíduos sólidos urbanos. Emissões de Biogás. Fluxo de gases.

ABSTRACT

REGATTIERI, C.R. **Quantification of the emission of biogas from landfills - a case study of the landfill in São Carlos.** 2009. 137 f Tese (Doutorado) – EESC – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

This work was developed at the NETeF (Thermal Engineering and Fluids Group) at EESC/USP, São Carlos, SP, and the local landfill in São Carlos –Guaporé Farm, and it had as aim the quantification of the emission biogas through of the landfill surface. It was developed a plaque of flow to capture biogas through the landfill surface in distincts points considering the age of the waste deposited and the different layer of the landfill. The measures were done of two ways, the first through a reading apparatus that has a principle of detection of CH₄ and CO₂ by double cells of the wave length by infrared with reference material GEM 2000, subsequently were used gasometric ampoule manufactured by Construmaq in São Carlos, that after the capture were taken to chromatographic analysis to detection of CH₄ and CO₂ percentages. These measures were done with a seasonality of one year. For a global emission location, the measures were located through the geographical coordinates. The mathematical calculation involved outflow equations and a projection of time of the biogas production too. It was observed that the emissions are significant and that the simple measures operating in landfills would be effective. The values found for CH₄ emissions measured in 2008 were 1741.41 m³/m².ano, and 2009 were 3315.88 m³/m².ano, and the emissions measured in CO₂ in 2008 was 16,915.85 m³ / m².ano, and in July 2009 were 27,601.30 m³/m².ano.

Key-words: Landfill. Emissions of gas. Flux of gases.

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 2-1 Balanço Energético da Terra	22
Ilustração 2-2 Caracterização Mássica de Resíduos Sólidos Domiciliares do Município de São Carlos.....	29
Ilustração 2-3 Ecossistema de Formação do Metano	34
Ilustração 2-4 Fases da Biodegradação dos Resíduos	35
Ilustração 2-5 Fases de Biodegradação da Matéria Orgânica em Aterros Sanitários.....	37
Ilustração 2-6 Transporte de Biogás e os Fatores que Afetam o Ambiente	39
Ilustração 2-7 Processos que regem a migração do biogás e os processos envolvidos.....	40
Ilustração 2-8: Equação 2.1	41
Ilustração 2-9 fluxo Advectivo	43
Ilustração 2-10 Classificação dos Modelos baseados no Nível de conhecimento e na Avaliação de Valores.....	46
Ilustração 2-11: Equação da Produção de Biogás	48
Ilustração 2-12 Taxa de Geração do Metano e Tempo de Decaimento.....	53
Ilustração 2-13 : Tempo de Decaimento	53
Ilustração 2-14: Taxa de degradação	53
Ilustração 2-15: Taxa de Degradação	54
Ilustração 2-16 Ensaios de Placas de Fluxo Estáticas e Dinâmicas	56
Ilustração 2-17 Estimativa de Produção do Biogás	60
Ilustração 2-18 Cálculo IPCC.....	60
Ilustração 2-19 Potencial de Geração do Metano	61
Ilustração 2-20 Quantidade de carbono Orgânico Degradável.....	62
Ilustração 2-21 Método <i>Good Practice Guidance</i>	63
Ilustração 2-22 Constante de Decaimento	64
Ilustração 3-1 Foto de Satélite do Aterro Sanitário de São Carlos.....	65
Ilustração 3-2 Área em planta dos sub-aterro AS-1 e AS-2	67
Ilustração 3-3 Queimador de biogás.....	72
Ilustração 3-4 Corte esquemático de um Aterro Sanitário	73
Ilustração 3-5 Características físicas do GEM 2000	74
Ilustração 3-6 Termômetro Digital	75
Ilustração 3-7 GPS – etrex – garmin	76

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 3-8 Ampolas gasométricas.....	77
Ilustração 3-9 Ampolas gasométricas – Caixa de Armazenamento	77
Ilustração 3-10 Cromatógrafo GC 2010	78
Ilustração 3-11 Cromatógrafo GC 2010	78
Ilustração 3-12 Placa de fluxo estática	79
Ilustração 3-13 Precipitação Mensal ref. Ano 2008	80
Ilustração 3-14 Precipitação Mensal ref. Ano 2009 até Agosto	81
Ilustração 3-15 Pontos de medidas demarcados com o GPS.....	82
Ilustração 3-16 Procedimento das medidas com o GEM 2000	84
Ilustração 3-17 Procedimento das medidas nos queimadores de biogás	85
Ilustração 3-18 Procedimento de Captura com as Ampolas Gasométricas	86
Ilustração 3-19 Procedimento de Captura com as Ampolas Gasométricas e a Caixa para Transporte para Análise Cromatográfica.....	86
Ilustração 3-20 Curva característica do CO ₂	87
Ilustração 3-21 Curva característica do CH ₄	87
Ilustração 3-22 Fluxo Mássico	88
Ilustração 3-23 Equação de Estado dos Gases.....	88
Ilustração 3-24 Número de mols	88
Ilustração 3-25 Constante de Decaimento - Degradabilidade	89
Ilustração 3-26 Constante de Decaimento	89
Ilustração 4-1 Ponto 1	91
Ilustração 4-2 Ponto 2	91
Ilustração 4-3 Ponto 3	92
Ilustração 4-4 Ponto 4	92
Ilustração 4-5 Ponto 5	93
Ilustração 4-6 Ponto 6	93
Ilustração 4-7 Ponto 7	94
Ilustração 4-8 Ponto 8 Flare.....	94
Ilustração 4-9 Ponto 9	95
Ilustração 4-10 Ponto 10	95
Ilustração 4-11 Ponto 11 Flare.....	96
Ilustração 4-12 Ponto 12	96
Ilustração 4-13 Ponto 13	97
Ilustração 4-14 Ponto 14	97

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-15 Ponto 15.....	98
Ilustração 4-16 Ponto 16.....	98
Ilustração 4-17 Ponto 17 Flare.....	99
Ilustração 4-18 Ponto 18.....	99
Ilustração 4-19 Ponto 19.....	100
Ilustração 4-20 Ponto 20.....	100
Ilustração 4-21 Ponto 21.....	101
Ilustração 4-22 Ponto 1.....	101
Ilustração 4-23 Ponto 2.....	102
Ilustração 4-24 Ponto 3.....	102
Ilustração 4-25 Ponto 4.....	103
Ilustração 4-26 Ponto 5.....	103
Ilustração 4-27 Ponto 6.....	104
Ilustração 4-28 Ponto 7.....	104
Ilustração 4-29 Ponto 8.....	105
Ilustração 4-30 Ponto 9.....	105
Ilustração 4-31 Ponto 10.....	106
Ilustração 4-32 Ponto 11.....	106
Ilustração 4-33 Ponto 12.....	107
Ilustração 4-34 Ponto 13.....	107
Ilustração 4-35 Ponto 14.....	108
Ilustração 4-36 Ponto 15.....	108
Ilustração 4-37 Ponto 16.....	109
Ilustração 4-38 Ponto 17.....	109
Ilustração 4-39 Ponto 18.....	110
Ilustração 4-40 Ponto 19.....	110
Ilustração 4-41 Ponto 20.....	111
Ilustração 4-42 Ponto 21.....	111

LISTAS DE TABELAS

Tabela 2-1 – GWP dos Gases Efeito Estufa	23
Tabela 2-2 Produção per Capita de Lixo Domiciliar em kg/dia.....	28
Tabela 2-3 Caracterização Física, em Porcentagem de Peso, dos RSD, de algumas cidades brasileiras.....	29
Tabela 2-4 Composição Típica Percentual do Biogás.....	33
Tabela 2-5 Equações que regem a produção de biogás	50
Tabela 2-6 Tempo de Geração e as Taxas Produzidas de Biogás	52
Tabela 2-7 Formas e Dimensões de Placas de Fluxo Dinâmicas e Estáticas	58
Tabela 2-8 Fluxo de CH ₄ em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos	59
Tabela 2-9 Fator de Correção do Metano para a Geração de Biogás em Aterros Sanitários ...	62
Tabela 2-10 Referência para o cálculo de COD	63
Tabela 3-1 Capacidade Volumétrica e Vida útil do Aterro Sanitário.....	69
Tabela 3-2 Coordenadas dos pontos do GPS.....	83
Tabela 4-1 Fluxo Mássico da Emissão do CH ₄	114
Tabela 4-2 Fluxo Mássico da Emissão do CO ₂	115

LISTAS DE SIGLAS

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
NETeF – Núcleo de Engenharia Térmica e de Fluídos
GEE – Gases Efeito Estufa
CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental
GWP – Potencial de Aquecimento Global
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
NBR – Norma Técnica Brasileira
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBAM – Instituto Brasileiro de Administração Municipal
PNSD – Pesquisa Nacional de saneamento Básico
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
USEPA – United States Environment al Protection Agency
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
FCM – Fator de Correção do Metano
COD – Carbono Orgânico degradável
CERs – Certificados de Emissões Reduzidas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Resíduos e Meio Ambiente.....	17
1.2	Objetivos deste Trabalho	19
2	ESTADO DA ARTE.....	20
2.1	Efeito Estufa	20
2.2	Aterro Sanitário	24
2.3	Resíduos	25
2.3.1	Definição e Classificação	25
2.4	Lixo Urbano – Considerações	27
2.5	Processo de Geração de Biogás em Aterros Sanitários	30
2.5.1	Operações em Aterros Sanitários	30
2.5.2	Fatores Abióticos.....	31
2.6	Mecanismo de Formação de Biogás em Aterros Sanitários	32
2.7	Migração do Biogás – Potenciais Efeitos Ambientais	37
2.8	Teoria Básica da Migração dos Gases através do solo em Aterros Sanitários	40
2.8.1	Difusão	41
2.8.2	Advecção.....	43
2.8.3	Gradientes de Pressão.....	44
2.9	Mecanismos de retardamento de percolação gasosa	44
2.9.1	Sorção.....	44
2.9.2	Ação Microbiológica.....	45
2.10	Modelos de Produção de Biogás em Aterros Sanitários de Resíduos Urbanos (RSU)	45
2.11	Taxas de Geração de Biogás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	48
2.12	Tempo de Geração do Biogás.....	52
2.13	Metodologia de Investigação In Situ	55
2.14	Emissões de gases em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos.....	59
2.15	Metodologias para estimativa teórica de geração de biogás em aterros de resíduos sólidos urbanos	60

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

2.15.1 United States Environment al Protection Agency - USEPA.....	60
2.15.2 Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC.....	60
2.15.3 Método de Decaimento de Primeira Ordem.....	63
3 EXPERIMENTAL	65
3.1 Introdução.....	65
3.2 Descrição do Aterro Sanitário de São Carlos	66
3.2.1 Localização e Acesso	66
3.2.2 Tipo de Aterro	66
3.2.3 Área	68
3.2.4 Topografia	68
3.2.5 Idade e Vida Útil do Aterro.....	68
3.2.6 Quantidade de Lixo Gerado	69
3.2.7 Memorial Descritivo do Aterro Sanitário.....	70
3.3 Instrumentação.....	74
3.3.1 GEM 2000 – Detector de Gases.....	74
3.3.2 Termômetro	75
3.3.3 GPS.....	75
3.3.4 Ampolas Gasométricas.....	76
3.3.5 Cromatografia Gasosa	78
3.3.6 Placa de Fluxo Estática	79
3.4 Dados Climáticos.....	79
3.5 Metodologia.....	81
3.6 GEM 2000	84
3.7 Placa de Fluxo	85
3.8 Análise das Amostras	87
3.9 Cálculo das Emissões (vazão) de CH ₄ e CO ₂	88
3.9.1 Emissão (Vazão) do CH ₄	88
3.9.2 Emissão (Vazão) do CO ₂	89
3.10 Cálculo de k (Constante de Decaimento)	89
3.11 Cálculo do Decaimento (meia Vida)	89
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	90

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

4.1	Introdução	90
4.2	Placa de Fluxo	90
4.2.1	Resultados da Placa de Fluxo para CH ₄ e CO ₂	90
4.3	Análise dos Gráficos – Concentração x Tempo – Resultantes dos Ensaios da Placa de Fluxo.....	112
4.3.1	Ensaios: Ponto 1, 2, 3, 4 ,5 e 10	112
4.3.2	Ensaios: Pontos 6, 7,8, e 9.....	112
4.3.3	Ensaios: Pontos 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18.....	112
4.3.4	Ensaios: Pontos 19, 20 e 21.....	112
4.4	Cálculo das Emissões	113
4.4.1	Emissões de CH ₄	113
4.4.2	Emissões de CO ₂	115
4.5	Resultado do valor do Cálculo de k (Constante de Decaimento)	116
4.6	Resultado do valor do Decaimento.....	116
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	117
5.1	Conclusões.....	117
5.2	Sugestões	118
	REFERÊNCIAS	119
	APÊNDICE	127
	APÊNDICE A	128
	ENSAIOS DA PLACA DE FLUXO	128

1 INTRODUÇÃO

1.1 Resíduos e Meio Ambiente

O crescimento do consumo das comunidades gera um aumento da produção de resíduos sólidos urbanos (RSU), cuja consequência é de difícil gestão por parte dos órgãos responsáveis.

Este problema gerado pelos resíduos sólidos urbanos (RSU), leva a implicações sobre a degradação ambiental e o esgotamento de alguns recursos naturais, impulsionando-nos a busca de soluções ambientais e sociais. Essa geração de resíduos nos remete a contaminação do ar, solo e água.

Na maior parte do mundo, os Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), têm sido utilizados para a destinação final de resíduos sólidos urbanos. Outras formas de diminuição de resíduos, tais como reciclagem, reutilização, redução, renovação e educação ambiental tem sido também utilizadas.

Os Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), além de serem utilizados como destino último, vem sendo utilizados como fonte de geração de energia. Neste sentido, o Protocolo de Kyoto regulamentou possibilidade de utilização de mecanismos para a redução de gases de efeito estufa.

Outro problema gerado em função do aumento do consumo é a emissão de gases que causam o efeito estufa, proveniente das emissões de veículos e de fontes estacionárias que queimam combustíveis fósseis e onde predomina o efeito do CO₂.

Já no caso dos Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), há a emissão do biogás, cuja maior parcela é composto por metano (CH₄), que possui uma contribuição muito mais significativa. Isto se dá tanto em razão de, molécula por molécula, este gás ter um efeito estufa cerca de vinte e uma vezes maior do que o do CO₂, como em razão de sua maior fração no biogás. A combustão do biogás em “flares”, às vezes feita nos aterros, não é suficiente para

eliminar o problema, pois é uma queima sem controle e, portanto pouco eficiente. Além disso, há vazamentos pela superfície do aterro e nas lagoas de chorume.

No caso do Brasil, destaca-se o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL. O MDL consiste na certificação de projetos de redução de emissões nos países em desenvolvimento e a posterior venda destas reduções.

Segundo o Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT (2008), esse mecanismo deve implicar em reduções de emissões adicionais àquelas que ocorreriam na ausência do projeto, garantindo benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo para a mitigação da mudança do clima .

Demonstra o relatório do Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT (2008), que o Brasil ocupa o 3º lugar em número de projetos e, em termos, de reduções de emissões com 287 projetos de MDL (8%), estando em primeiro lugar a China com 1.212 e, em segundo, a Índia com 987 projetos. Dos 287 projetos desenvolvidos no Brasil (em fase de validação/aprovação), 9% correspondem a projetos de aterros sanitários prevendo uma redução de 26% das emissões totais dos projetos brasileiros e mostrando o potencial dos projetos de aterros sanitários no escopo do MDL.

Segundo o Relatório do IPCC/ONU de 2007, divulgado em Paris, a concentração do metano na atmosfera global aumentou de um valor do período pré-industrial cerca de 715 ppb para 1732 ppb no começo da década de 1990, e está em 1774 ppb em 2005. A concentração do metano em 2005 excedeu em muito a faixa natural dos últimos 650.000 anos (320 para 790 ppb) determinado através de núcleos de gelo.

Neste sentido torna-se de fundamental importância o estudo da geração e emissão de biogás em Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), já que o processo de decomposição da matéria orgânica resulta na geração do biogás, cuja emissão se dá através da cobertura do resíduo, pelo sistema de drenagem dos gases (flares) e pela superfície das lagoas de chorume. Portanto o sistema de cobertura dos resíduos é de fundamental importância para a minimização da poluição atmosférica, bem como quando do encerramento da atividade, deverá ser considerado o aproveitamento deste biogás produzido.

1.2 Objetivos deste Trabalho

Este trabalho realizado junto ao NETeF – Núcleo de Engenharia Térmica e de Fluidos da EESC/USP em São Carlos e ao aterro sanitário da cidade, tem como objetivo quantificar a emissão de biogás através da superfície do Aterro Sanitário por meios de investigações experimentais e laboratoriais.

Dentre os objetivos específicos procurou-se:

- calcular experimentalmente o fluxo de biogás através de ensaios de campo, com sazonalidade de um ano, compreendido entre os períodos de julho de 2008 e igual período em 2009;
- demonstrar a quantidade produzida em pontos específicos, através de coordenada geográficas (GPS), localizando assim globalmente o ponto de emissão;
- calcular experimentalmente a projeção da quantidade de emissão do biogás em função da quantidade e composição do resíduo.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Efeito Estufa

Está comprovado o constante aumento da concentração do dióxido de carbono na atmosfera do planeta. Uma indicação deste constante aumento, está no aumento das concentrações do dióxido de carbono nas geleiras das calotas polares nos últimos dois séculos.

Os gases de efeito estufa (GEE) são caracterizados pelo fato de que suas moléculas possuem modos de vibração capazes de serem excitados pela absorção de fótons de ondas eletromagnéticas da radiação térmica emitida no infravermelho, onde se concentra praticamente a totalidade da radiação emitida pela Terra e terem longevidade na atmosfera. Por outro lado, na sua maioria eles não absorvem fótons de comprimentos de ondas mais curtos onde concentra a energia da luz solar. O ozônio (O_3) é um dos poucos gases que absorvem tanto no ultra violeta como no infra vermelho.

Os principais gases que contribuem para o aumento do efeito estufa e suas respectivas fontes antropogênicas de acordo com o Programa ProClima da CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2009), são os seguintes:

- CO_2 - Responsável por cerca de 60% do efeito-estufa, cuja permanência na atmosfera é de pelo menos centena de anos, o dióxido de carbono é proveniente da queima de combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo, gás natural, turfa), queimadas e desmatamentos, que destroem reservatórios naturais e sumidouros, que tem a propriedade de absorver o CO_2 do ar.
- CH_4 - Responsável por 15 a 20% do efeito estufa, é componente primário do gás natural, também produzido por bactérias no aparelho digestivo do gado, aterros sanitários, plantações de arroz inundadas, mineração e queima de biomassa.

- N_2O - Participando com cerca de 6% do Efeito-Estufa, o óxido nitroso é liberado por microorganismos no solo (por um processo denominado nitrificação, que libera igualmente nitrogênio - NO). A concentração deste gás teve um enorme aumento devido ao uso de fertilizantes químicos, à queima de biomassa, ao desmatamento e às emissões de combustíveis fósseis.
- CFCs - Responsáveis por até 20% do efeito estufa, os clorofluorcarbonos são utilizados em geladeiras, aparelhos de ar condicionado, isolamento térmico e espumas, como propelentes de aerossóis, além de outros usos comerciais e industriais. Como se sabe, esses gases reagem com o ozônio na estratosfera, decompondo-o e reduzindo, assim, a camada de ozônio que protege a vida na Terra dos nocivos raios ultravioletas.
- O_3 - Contribuindo com 8% para o aquecimento global, o ozônio é um gás formado na baixa atmosfera, sob estímulo do sol, a partir de óxidos de nitrogênio (NO_x) e hidrocarbonetos produzidos em usinas termoeletricas, pelos veículos, pelo uso de solventes e pelas queimadas.
- O vapor d'água presente na atmosfera também absorve parte da radiação emanada pela Terra e é um dos maiores contribuintes para o aquecimento natural do globo. Apesar de não ser produzido em quantidade significativa por atividades antrópicas, considera-se que, com mais calor, haverá mais evaporação d'água e, por conseguinte, um aumento de sua participação no aumento do efeito estufa.

A Ilustração 2.1, demonstra o balanço de energia da Terra incluindo a radiação solar incidente e refletida e a emissão e absorção no infravermelho que mantém constante a temperatura do planeta.

Ilustração 2-1 Balanço Energético da Terra
 Fonte: GRADEL, T.E.; CRUTZEN, P.J. (1997)

Os gases causadores do efeito estufa possuem concentrações diferentes na atmosfera, portanto diferem quanto a seus potenciais de aquecimento global (GWP) – definido como a capacidade de absorção e redistribuição da energia térmica emitida pela Terra, em função da vida média de cada gás, sendo utilizado como unidade o CO_2 .

A Tabela 2.1 mostra o potencial de aquecimento global dos gases efeito estufa e suas características.

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Espécies	Fórmula Química	Tempo de Vida (anos)	Potencial de aquecimento global (horizonte de tempo)		
			20 anos	100 anos	500 anos
Dióxido de Carbono	CO ₂	Variável	1	1	1
Metano	CH ₄	12±3	56	21	6,5
Óxido Nitroso	N ₂ O	120	280	310	170
Ozônio	O ₃	0,1 – 0,3	n.d.	n.d.	n.d.
HFC-23	CHF ₃	264	9.100	11.700	9.800
HFC-32	CH ₂ F ₂	5,6	2.100	650	200
HFC-41	CH ₃ F	3,7	490	150	45
HFC-43-10mee	C ₅ H ₂ F ₁₀	17,1	3.000	1.300	400
HFC-125	C ₂ HF ₅	32,6	4.600	2.800	920
HFC-134	C ₂ H ₂ F ₄	10,6	2.900	1.000	310
HFC-134 ^a	CH ₂ FCF ₃	14,6	3.400	1.300	420
HFC-152 ^a	C ₂ H ₄ F ₂	1,5	460	140	42
HFC-143	C ₂ H ₃ F ₃	3,8	1.000	300	94
HFC-143 ^a	C ₂ H ₃ F ₃	48,3	3.800	3.800	1.400
HFC-227ea	C ₃ HF ₇	36,5	2.900	2.900	950
HFC-236fa	C ₃ H ₂ F ₆	209	6.300	6.300	4.700
HFC-145ca	C ₃ H ₃ F ₅	6,6	560	560	170
Hexafluorido de enxofre	SF ₆	3200	23.900	23.900	34.900
Perfluorometano	CF ₄	50.000	6.500	6.500	10.000
Perfluoroetano	C ₂ F ₆	10.000	9.200	9.200	14.000
Perfluoropropano	C ₃ F ₈	2.600	4.800	7.000	10.100
Perfluorociclobutano	c-C ₄ F ₈	3.200	6.000	8.750	12.700
Perfluoropentano	C ₅ F ₁₂	4.100	5.100	7.500	11.000
Perfluorohexano	C ₆ F ₁₄	3.200	5.000	7.400	10.700

Tabela 2-1 – GWP dos Gases Efeito Estufa

Fonte: IPCC, 1996

É importante notar na Tabela 2.1 que o metano (CH₄), que é emitido entre outras fontes, pela fermentação dos resíduos sólidos em locais para disposição final tem GWP bastante maior que o do CO₂, variável com o horizonte de tempo considerado. Em um horizonte de 20 anos, este potencial é 56 vezes maior (mesma massa para os dois gases), decrescendo para 21 aos 100 anos e 6,5 aos 500 anos

2.2 Aterro Sanitário

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – ITP (2000), um Lixão é a forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos que se caracteriza pela forma inadequada da disposição do resíduo sobre o solo sem critérios de proteção ao meio ambiente e a saúde pública.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1985), define Aterro Controlado como uma técnica de disposição de resíduos no solo, sem causar danos ou risco à saúde pública e à segurança local, minimizando os impactos ambientais, sendo que neste tipo de aterro, não há impermeabilização do solo, nem coleta do chorume e coleta de gases.

As ABNT (1992), (1989), definem Aterro sanitário como uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à segurança minimizando os impactos ambientais.

Um Aterro Sanitário é composto por uma impermeabilização do solo base, sistemas de coleta de percolados (chorume), sistemas de coletas de biogás, drenagem de águas pluviais, monitoramento ambiental de solo e águas profundas (poços de inspeção).

As Normas Técnicas aplicáveis aos Aterros Sanitários são:

- NBR 1057 e NBR 1025, norteiam os critérios para construção e operação de resíduos perigosos;
- NBR 8418 e NB 842, norteiam os projetos de aterros industriais perigosos;
- NBR 8419 e NB 843, norteiam os projetos de aterros de resíduos sólidos urbanos;
- NBR 8849 e NB 844, norteiam os projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos;

- NBR 13896, estabelece as condições mínimas exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, de forma a proteger adequadamente as redes hídricas superficiais e subterrâneas próximas, bem como as operações e operadores do aterro e populações vizinhas.

2.3 Resíduos

2.3.1 Definição e Classificação

A classificação dos resíduos sólidos é apresentada pela ABNT (2004b), que classifica quanto ao risco potencial ao meio ambiente e a saúde pública:

- **Classe I** – considerados como resíduos perigosos, aqueles que, em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, podem apresentar riscos à saúde pública, provocando ou contribuindo para o aumento de mortalidade ou incidência de doenças e/ou apresentar efeitos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada;
- **Classe IIA** – são aqueles resíduos considerados não inertes. São os resíduos que não se enquadram nas classificações de resíduo Classe I e nem resíduos Classe IIB, podendo ter propriedades de combustíveis, biodegradabilidade ou solubilidade em água;
- **Classe IIB** – resíduos considerados inertes; são aqueles que, quando submetidos a testes de solubilização, não apresentam concentrações de elementos superiores aos padrões definidos na listagem numero oito da norma NBR 10006 – solubilização de resíduos perigosos – procedimentos.

Segundo a Lei Estadual 12.300 de 16 de março de 2006, os resíduos sólidos podem ser classificados:

- **Resíduos urbanos:** os provenientes de residências, estabelecimentos comerciais e prestador de serviços, da varrição, de podas e da limpeza de vias, logradouros públicos e sistemas de drenagem urbana passíveis de delegação a particular, nos termos de Lei Municipal;

- **Resíduos industriais:** os provenientes de atividades de pesquisa e de transformação de matéria-primas e substâncias orgânicas ou inorgânicas em novos produtos, por processos específicos, bem como os provenientes das atividades de mineração e extração, de montagem e manipulação de produtos acabados e aqueles gerados em áreas de utilidade, apoio, depósito e de administração das indústrias e similares, inclusive resíduos provenientes de Estações de Tratamento de Água – ETAs e Estações de Tratamento de Esgoto - ETEs;
- **Resíduos de serviços de saúde:** os provenientes de qualquer unidade que execute atividades de natureza médico-assistencial humana ou animal, os provenientes de necrotérios, funerárias e serviços de medicina legal, e os provenientes de barreiras sanitárias;
- **Resíduos de atividades rurais:** os provenientes da atividade agropecuária, inclusive os resíduos dos insumos utilizados;
- **Resíduos de Portos, Aeroportos, Terminais Rodoviários e Ferroviários postos de fronteira e estruturas similares:** os resíduos sólidos de qualquer natureza provenientes de embarcação, aeronave ou meios de transportes terrestre, incluindo os produzidos nas atividades de operação e manutenção, os associados às cargas e aqueles gerados nas instalações físicas ou aéreas desses locais;
- **Resíduos da construção civil:** os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da reparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concretos em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras, compensados, forros e argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações e fiação elétrica, comumente chamados de entulho de obras, calça ou metralha;

2.4 Lixo Urbano – Considerações

De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSD (2000), realizada pelo Instituto Nacional de Geografia e Estatística – IBGE, (2000), referiu-se a três parâmetros: população urbana afetada, número de municípios por região geográfica, e o peso dos resíduos coletados.

Esta pesquisa demonstrou que a destinação final do lixo coletado no país, 47,1% são depositados em aterros sanitários; 22,3% em aterros controlados e 30,5% em lixões. Em relação aos municípios, 63,3% utilizam lixões e 32,2% aterros adequados (13,8% sanitários, 18,4% aterros controlados), e 5% não forneceu o destino.

A produção per capita de lixo domiciliar em kg/dia, em municípios que possuem balança, e os que não possuem balança, que é estimado pelo número de viagens realizadas pelos caminhões e sua capacidade volumétrica, mediante sua população é demonstrada na Tabela 2.2.

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Município População (nº de habitantes)	Produção per capita de lixo domiciliar (kg/dia)	Município com balança (kg/dia)	Município sem balança (kg/dia)
Total	0,74	1,29	0,53
Até 9.999	0,46	0,57	0,49
De 10.000 a 19.999	0,42	0,42	0,49
De 20.000 a 49.999	0,48	0,60	0,54
De 50.000 a 99.999	0,56	0,70	0,57
De 100.000 a 199.999	0,69	0,81	0,58
De 200.000 a 499.999	0,78	0,93	0,58
De 500.000 a 999.999	1,29	1,50	0,00
Mais de 1.000.000	1,16	2,04	0,76

Tabela 2-2 Produção per Capita de Lixo Domiciliar em kg/dia

Fonte: IBGE – Diretoria de Pesquisas. Departamento de População e Indicadores sociais. PNSB (2000)

Observa-se que nas cidades com até 200.000 habitantes, pode-se estimar a quantidade coletada, variando entre 450 e 700 gramas por habitante/dia; acima de 200.000 habitantes, essa quantidade aumenta para a faixa entre 800 e 1.200 gramas por habitante/dia.

A ABNT (2004b), define a caracterização do resíduo sólido urbano como sendo a “determinação dos constituintes e de suas respectivas porcentagens em peso e volume, em uma amostra de resíduos sólidos, podendo ser físico, químico e biológico.

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Zanin e Mancini (2004), demonstram a caracterização física dos resíduos sólidos domiciliares, em relação a coleta convencional de diversas cidades brasileiras em porcentagem de peso, conforme Tabela 2.3:

Cidade	Ano Publicação	Plástico	Vidro	Metal	Papel	Matéria Orgânica	Outros
São Carlos (SP)	1989	8,50	1,40	5,40	21,30	56,70	6,70
Juiz de Fora (MG)	1990	10,78	1,36	3,23	14,60	68,12	1,91
Manaus (AM)	1992	8,62	2,18	4,31	18,94	58,69	7,26
Curitiba(PR)	1993	6,00	2,00	2,00	3,00	66,00	21,00
Rio de Janeiro(RJ)	1993	15,00	3,00	4,00	23,00	22,00	33,00
Araraquara(SP)	1996	12,10	0,84	2,80	2,10	82,16	-
Fortaleza (CE)	1999	20,00	5,00	5,00	5,00	45,00	20,00
Botucatu (SP)	2000	8,37	1,90	3,85	7,61	74,17	4,01
Caxias do Sul (RS)	2003	14,62	2,42	2,49	11,82	45,97	22,68

Tabela 2-3 Caracterização Física, em Porcentagem de Peso, dos RSD, de algumas cidades brasileiras
Fonte: Zanin e Mancini (2004)

Segundo Frésca (2007), a caracterização física dos resíduos sólidos urbanos, no município de São Carlos, quanto à sua participação mássica, dividindo em matéria orgânica, papel e papelão, embalagem longa vida, vidro, metal e alumínio, plástico, plásticos filmes e outros, conforme Ilustração 2.2.

Ilustração 2-2 Caracterização Mássica de Resíduos Sólidos Domiciliares do Município de São Carlos
Fonte: Frésca (2007)

2.5 Processo de Geração de Biogás em Aterros Sanitários

2.5.1 Operações em Aterros Sanitários

A operação nos Aterros Sanitários de Resíduos Urbanos, é uma processo específico para a melhoria dos fatores abióticos. Este procedimento geralmente afeta vários fatores abióticos simultaneamente, tornado o efeito global no aterro difícil de ser previsto a partir dos conhecimentos dos fatores individuais.

Estes fatores segundo Chistensen et al. (1992), em sua revisão bibliográfica relatam estudos laboratoriais sobre a operação de estabilização, lixiviados e geração de gases no aterro:

- **Resíduos de Composição:** A caracterização dos resíduos depositados no aterro normalmente é em função da necessidade da comunidade, e não há estudos de como controlar como são depositados. Foi demonstrado em estudo laboratorial, que o aumento de papel jornal não aumenta a produção de biogás, já matéria orgânica de cozinha e jardim, atrasaram a produção de metano, supostamente em função de uma intensa geração ácida, mas a longo prazo a produção foi aumentada devido a presença de pesticidas;
- **Adição de Lodo:** Efeitos potencialmente positivos da adição do lodo podem ser atribuídos ao aumento do teor de água, fornecendo nutrientes facilmente disponíveis e ao fornecimento de uma biomassa anaeróbia ativa, fatores que levariam ao aumento da produção de metano. Os efeitos benéficos deste potencial, parecem estar condicionados por dois fatores:
 - Se as condições metanogênicas já estão presentes, além do lodo do esgoto pode ter apenas um efeito limitante;
 - A influência do lodo de esgoto, por exemplo, lamas sépticas, sobre o pH do aterro pode ter um efeito negativo sobre a produção de metano, enquanto neutro, bem tamponada como lodo de esgoto pode ter efeitos positivos.(LECKIE et al., 1979; MELDEN LEUSCHNER, 1983; BUIVID, 1980; LEUSCHNER, 1989).

- **Retalhamento:** A trituração de resíduos antes da sua disposição pode ser potencialmente vantajosa, tendo efeitos sobre a estabilização dos resíduos em termos de aumentar a homogeneidade dos resíduos pelo tamanho e redução de mistura, aumentando a superfície específica dos resíduos, eliminando barreiras de água causada por sacos de plástico e folhas, melhorando a distribuição do teor de água no aterro sanitário.
- **Compactadores:** A compactação é uma operação rotineira, tendo como objetivo a necessidade de otimizar a utilização dos aterros sanitários quanto a capacidade de depósito e sua estabilidade estrutural. A compactação leva a homogeneização e a mistura dos resíduos.
- **Recirculação dos Lixiviados (Chorume):** É um dos processos de gestão de aterros muito estudada. Nos estudos são encontrados aspectos positivos de recirculação na produção e composição do gás (Christensen et al., 1985); nenhum efeito (Barlaz et al.; 1987) e sobre os efeitos negativos. (LEUSCHNER e MELDEN, 1983; BEKER, 1987; KINMAN et al., 1987).

Os argumentos relatados para a realização da recirculação de lixiviados além de proporcionar o tratamento interno, são: aumentar a produção de metano pelo aumento do teor de água e da circulação dos resíduos e fornecimento de nutrientes e de biomassa. Estas experiências não são simples, pois em um clima relativamente úmido, a recirculação é supostamente benéfica apenas no primeiro ano de vida do aterro. Em climas secos, a recirculação pode ser benéfica para períodos mais longos, a fim de melhorar o teor de distribuição de água no aterro.

2.5.2 Fatores Abióticos

A diversidade dos resíduos em um aterro sanitário, a degradabilidade da fração matéria orgânica, podem ocasionar um ecossistema ineficiente. Esta diversidade caracterizada pelos fatores abióticos: oxigênio, hidrogênio, pH e alcalinidade, nutrientes, inibidores, temperatura e umidade. (CHRISTENSEN et al. 1992)

- **Oxigênio:** A ausência de oxigênio livre é essencial para a bactéria anaeróbia para seu crescimento e realização da conversão do carbono sólido para metano e dióxido de carbono;
- **Hidrogênio:** O hidrogênio é produzido tanto pela fermentação e as bactérias acetogênicas;
- **pH e Alcalinidade:** As bactérias metanogênicas funcionam eficazmente dentro de uma estreita faixa de pH – 6 a 8. (ZEHNDER et.al., 1982). O ecossistema metanogênico em um aterro sanitário é bastante delicado, e uma relação equilibrada entre o grupo bacteriano é fundamental para uma boa produção de metano;
- **Sulfato:** A redução do sulfato e a redução das bactérias metanogênicas convertem ácido acético em hidrogênio;
- **Nutrientes:** O ecossistema anaeróbio deve, além da matéria orgânica, ter acesso a todos os nutrientes necessários, em especial ao fósforo. O aterro sanitário não será limitado por nitrogênio e fósforo, mas a homogeneização ineficiente dos resíduos pode resultar em ambientes com nutrientes limitados;
- **Temperatura:** Em temperaturas mais elevadas, a produção de metano ocorre de formas mais eficaz, produzindo mais calor.

2.6 Mecanismo de Formação de Biogás em Aterros Sanitários

O mecanismo de formação de gases em aterros conforme relatado anteriormente é bastante complexo, devido aos diversos componentes e suas interações físico-químicas e biológicas em determinado período de tempo (KIM et al, 2008). O processo de decomposição destes componentes é predominantemente anaeróbio, gerando compostos gasosos como CH₄, H₂S, CO₂ e NH₃. A Tabela 2.4 apresenta a composição típica do percentual do biogás produzido em aterros sanitários de resíduos Urbanos. (ALCÂNTARA, 2007)

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

GÁS	FÓRMULA	% VOLUME
Metano	CH ₄	45 – 60
Dióxido de carbono	CO ₂	40 – 60
Nitrogênio	N ₂	2,0 – 5,0
Oxigênio	O ₂	0,1 – 1,0
Monóxio de carbono	CO	0,0 – 0,2
Sulfeto de Hidrogênio	H ₂ S	0,0 – 0,1
Amônia	NH ₃	0,1 – 1,0
Hidrogênio	H ₂	0,0 – 0,2
Componentes traço	-----	0,01 – 0,6

Tabela 2-4 Composição Típica Percentual do Biogás
Fonte: ALCÂNTARA (2007)

A Tabela 2.4, demonstra que o metano e o dióxido de carbono são predominantes no processo de decomposição dos resíduos em condições anaeróbias.

A Ilustração 2.3 ilustra a interação das bactérias anaeróbias do aterro e os grupos envolvidos – substratos e produtos intermediários. A degradação anaeróbia pode ser vista como sendo um composto de três fases. Na primeira, sólidos dissolvidos compostos complexos orgânicos são hidrolisados e fermentados pelos ácidos graxos voláteis, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono. Na segunda fase, um grupo de bactérias acetogênicas converte os produtos da primeira fase para ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Na etapa final, o metano é produzido pelas bactérias acetotróficas a partir de ácido acético ou pelas bactérias hidrogenotróficas a partir da redução de dióxido de carbono, resultando nas seguintes reações catabólicas. (CHRISTENSEN; KJELDSSEN, 1989)

Metanogênese acetotrófica: $\text{CH}_3\text{COOOH} \longrightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$

Matenogênese hidrogenotrófica: $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 2-3 Ecossistema de Formação do Metano

Fonte: Christensen e Kjeldsen (1989)

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

A hidrólise é um processo muito importante no processo do ambiente do aterro sanitário, de maneira que os resíduos orgânicos sólidos devem ser dissolvidos antes dos microorganismos converte-los. É uma etapa inicial e sua velocidade pode limitar o processo de conversão anaeróbia.

A biodegradação dos resíduos, segundo Senior e Balba (1990), podem ser relacionadas em oito fases distintas, conforme Ilustração 2.4:

Ilustração 2-4 Fases da Biodegradação dos Resíduos
Fonte: Senior&Balba (1990)

A descrição de cada fase demonstrada na Ilustração 2.4:

- **Fase I:** Uma pequena fase aeróbia esgotando O₂ por compostagem da matéria orgânica facilmente degradável de CO₂;
- **Fase II:** Bactérias acidogênicas (fermentativa), produzem em condições anaeróbias, ácidos graxos voláteis, CO₂ e H₂. A presença dos gases reduz o teor de N₂;
- **Fase III:** Numa segunda fase anaeróbica, começam a crescer bactérias metanogênicas produtoras de CH₄, enquanto diminuição de CO₂ e H₂;
- **Fase IV:** A fase metanogênica estável é caracterizada por 50 – 60% de CH₄ e baixas concentrações de H₂. Sendo este último oxidação de CO₂ para CH₄;

- **Fase V:** O ar começa a penetrar da parte exterior do aterro reduzindo a formação de CH_4 . As taxas mais baixas de introdução de ar, levam a um número relativamente mais baixo de CO_2 e de um aumento relativo do conteúdo de CH_4 na composição do biogás;
- **Fase VI:** Metano produzido pelo resíduo é oxidado a CO_2 , uma vez que migra através da parte exterior do aterro. N_2 está presente em concentração importante no biogás;
- **Fase VII:** A formação de metano nesta fase é insignificante e a introdução de ar, agora, oxida os sólidos de carbono orgânico (redução de espécies inorgânicas), na produção de CO_2 ;
- **Fase VIII:** As taxas do processo abordam agora as taxas encontradas em atividade do solo do aterro e o biogás começa a assemelhar-se com o ar do solo.

As biodegradação do biogás segundo Tchobananoglous et al. , 1993, são descritas em cinco fases:

- **Fase Aeróbica inicial:** a biodegradação ocorre sob condições aeróbias. Esta fase pode durar algumas semanas ou meses, onde o processo de hidrólise ocorre sob condições aeróbias;
- **Fase de Transição:** ocorre a queda no nível de oxigênio molecular e o início do estabelecimento das condições anaeróbias;
- **Fase ácida anaeróbia:** engloba os processo de decomposição que são precursores da metanogênese. Nesta fase, o aumento da atividade microbiana resulta na grande produção e acúmulo de quantidades significativas de ácidos orgânicos e CO_2 ;
- **Fase metanogência:** nesta fase acentuam-se a atividade dos microorganismos acetotróficos e hidrogenotróficos produtores de metano. As concentrações de CH_4 e CO_2 atingem normalmente valores numa faixa de 50 – 70% e 30 – 50% do volume do biogás produzido, respectivamente;

- **Maturação:** nesta fase, considerada a última do processo de degradação dos resíduos, ocorre a redução da atividade biológica em virtude da escassez de nutrientes. A fase de maturação é caracterizada pela redução na produção de CH_4 e CO_2 e pelo aumento nas concentrações de O_2 e N_2 .

A Ilustração 2.5 apresenta as fases de biodegradação da matéria orgânica em aterros sanitários.

Ilustração 2-5 Fases de Biodegradação da Matéria Orgânica em Aterros Sanitários

Fonte: TCHOBANOGLOUS et al, (1993)

2.7 Migração do Biogás – Potenciais Efeitos Ambientais

O biogás produzido nos aterros sanitários não possui extração, em algumas situações são queimados em flares, e em número muito pequeno é utilizado para alguma fonte de energia alternativa. Portanto, na maioria dos aterros sanitários o biogás é emitido para a atmosfera (LUNING; TRENT, 1993).

A migração e as emissões do biogás levam a diferentes efeitos no ambiente tais como:

- **Incêndio e risco de explosões:** O teor de metano é o principal fator, pois o intervalo limite para explosão situa-se entre 5 e 15% na pressão atmosférica e, temperatura ambiente (GENBEDIEN et al.,1992). Se o biogás é diretamente ventilado para a atmosfera não existe perigo de explosão;
- **Riscos para a saúde:** O teor de dióxido de carbono existente no biogás desloca oxigênio no sistema respiratório e pode causar indisposições mesmo em baixas concentrações.
- **Danos a vegetação:** A principal razão é a remoção de oxigênio na zona circundante do aterro. Essa remoção ocorre devido a um deslocamento do oxigênio pelo biogás ou a oxidação do metano;
- **Poluição de águas subterrâneas:** Alguns dos componentes do biogás são altamente solúveis em água, e muitos dos vetígios orgânicos são solúveis em água e podem ser lixiviados pela infiltração da água;
- **Efeitos globais de clima:** Como descrito anteriormente, o metano é um poderoso gás efeito estufa;
- **Odores:** O cheiro desagradável não são originários de componentes principais do biogás, mas estão ligados à fase ácida inicial de fermentação, onde mercaptanas e ácidos voláteis são formados.

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

A Ilustração 2.6 apresenta o transporte do biogás e os fatores que afetam o ambiente.

Ilustração 2-6 Transporte de Biogás e os Fatores que Afetam o Ambiente
Fonte: Lunning E Tent, 1993

2.8 Teoria Básica da Migração dos Gases através do solo em Aterros Sanitários

A Figura 2.7 demonstra em um aterro conceitual, os processos que regem a migração do biogás e os processos envolvidos (CHRISTENSEN et al. , 1989).

Ilustração 2-7 Processos que regem a migração do biogás e os processos envolvidos

Fonte: Christensen and Kjeldsen (1989)

Este trabalho dará ênfase a apenas alguns processos, tendo em vista seu objetivo é a quantificação da emissão do biogás.

Segundo Ghabaee and Rodwell, 1989, muitas investigações demonstram que ambos os processos de difusão e advecção são fatores importantes no processo de migração de gases em aterros sanitários.

2.8.1 Difusão

É uma das formas mais importantes de transporte de gases por solos não arenosos, sendo este o mais comum utilizado na cobertura de resíduos sólidos (aterros sanitários).

Fluxos difusivos são causados por variações nas concentrações de gases devido a movimentos Brownianos das moléculas de gases, de sinal oposto ao gradiente de concentração, agindo de forma a diluir a concentração e redução dos gradientes de concentrações, cessando quando da anulação destes gradientes de concentração.

O fluxo difusivo pode ser descrito pela Lei de Fick:

$$J_D = -\epsilon_a D \frac{\partial C}{\partial x}$$

Ilustração 2-8: Equação 2.1
Fonte: Williams and Aitkenhead, 1991

Onde:

J_D = fluxo difusivo ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

ϵ_a = fração do gás

D = coeficiente de difusão no solo ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

$\frac{\partial C}{\partial x}$ = gradiente de concentração (g m^{-4})

Para difusão em solos não saturados, a Lei de Fick, destaca que o caminho livre para as moléculas de gases é pequeno, devido ao grande número de colisões em função do tamanho dos poros. (WILLIAMS and AITKENHEAD, 1991).

Em se tratando de solos saturados, o fluxo dos gases é também governado pela colisão de moléculas com as paredes dos poros, chamada de difusão KNUDSEN. (GHABAE and RODWELL, 1989).

Em termos gerais, a difusão de qualquer substância na fase gasosa é muito mais significativa do que na fase líquida (o coeficiente de difusão na fase gasosa é aproximadamente 1×10^4 vezes maior do que o mesmo coeficiente na solução), portanto, a difusão na fase gasosa pode ser importante mesmo para substâncias que têm baixa pressão de vapor.

A espessura do solo utilizado como camada de cobertura de aterros influencia, também, no tempo de transporte dos gases. Quanto mais espessa for a camada de cobertura, mais lenta será a percolação do gás por difusão, maior será a possibilidade do gás ficar retido nos poros do solo, podendo ocorrer também uma retenção física, química ou biológica (ação de microorganismos metanotróficos).

Sabe-se também que, quanto maior a permeabilidade do solo, maior a capacidade dele permitir a difusão de massa gasosa ocorra pelos poros do solo. Em solos saturados o gás pode ficar ocluso e o fluxo gasoso reduzir e passar a depender de sua dissolução na água, principalmente quando se trata de solos argilosos, o que provoca um grande retardamento nesta percolação, devido a presença dos líquidos (CAMPOS et al, 1999).

O aumento da temperatura acentua a difusão no solo devido ao aumento dos coeficientes de difusão em ambas as fases líquida e gasosa, assim como a taxa de variação da densidade de vapor em função da concentração. A temperatura afeta também a interação entre a substância e o solo, alterando da mesma forma o coeficiente de difusão. Este efeito pode ser explicado pela maior possibilidade do gás se solubilizar junto à parte líquida facilitando a dessorção da substância (CAMPOS et al, 1999).

De acordo com Maciel (2003), através do coeficiente de difusão observa-se a facilidade ou a dificuldade do fluido atravessar o solo. Dessa forma pode-se concluir que quanto maior a permeabilidade do solo, maior a capacidade dele permitir que um fluxo difusivo de massa ocorra através de seus poros. Assim o coeficiente de difusão desse solo será maior quanto maior for a sua permeabilidade.

Portanto, conclui-se que a difusão de gases no solo varia em função da característica física do solo, onde destaca-se a presença de argila; do arranjo dos grãos que refletem na porosidade e distribuição dos poros; tamanho dos poros, porosidade ocupada por líquidos intersticiais; contração, que se relaciona à presença de trincas; das propriedades químicas; propriedades físicas do gás (temperatura, viscosidade, gradiente de pressão); concentração da espécie gasosa entre regiões do solo e finalmente o consumo ou geração de gases por parte dos microorganismos presentes no solo.

2.8.2 Advecção

Ocorre devido à diferença de pressão entre dois pontos. (IGNATUS, 1999). O fluxo advectivo de um gás ocorre através da porosidade média de um solo, e é causado pelo gradiente de pressão, sendo descrito pela Lei de Darcy:

$$J_A = -C \frac{k_a}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}$$

Ilustração 2-9 fluxo Advectivo
Fonte: Lei de Darcy

Onde:

J_A = Fluxo advectivo ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

C = Concentração do gás (g m^{-3})

k_a = Coeficiente de permeabilidade do solo (m^2)

μ = Viscosidade do gás (N s m^{-2})

$\frac{\partial p}{\partial x}$ = Gradiente de pressão ($\text{Pa m}^{-1} = \text{N m}^{-3}$)

É considerado como um movimento físico da massa gasosa, sendo impulsionado por diferenças de pressão total entre duas ou mais regiões distintas. (SEELY e HUNT, 1994; MENDONÇA, 2007)

A magnitude do fluxo advectivo está associada à sua velocidade; características gravimétricas particulares do material que influem na permeabilidade; ou do meio físico que ele está sendo transportado (vazios preenchidos pelo ar ou líquidos), pois o gás pode dissolver-se em um líquido e ser transportado por ele. Portanto, para solos pouco permeáveis, sem caminhos preferenciais, este tipo de transporte pode ser desconsiderado. Para solos permeáveis, pode-se considerar que a taxa de infiltração é significativa para o cálculo de fluxo gasoso (MORIN et al, 1991; MENDONÇA, 2007).

2.8.3 Gradientes de Pressão

Para estudos de fluxo de gases em aterros sanitários de resíduos urbanos (RSU), deve-se levar em conta gradientes de pressão, que por advecção, interferem no sentido da movimentação de gases. Diz-se que o gradiente é positivo quando a pressão interna é maior do que a pressão atmosférica ($P_{int} > P_{atm}$). O gradiente é nulo quando há a igualdade entre pressões ($P_{int} = P_{atm}$) e negativo quando a pressão interna é menor do que a pressão atmosférica ($P_{int} < P_{atm}$) (MACIEL, 2003).

2.9 Mecanismos de retardamento de percolação gasosa

Existem dois mecanismos principais que interferem na percolação gasosa em aterros de resíduos urbanos (RSU): a sorção e a ação microbiológica.

2.9.1 Sorção

Fenômeno químico que envolve a partição do gás através de reações químicas em outros sub-compostos. Serve para retardar o transporte de gases traços quando difundidos em meios porosos (LANG et al., 1989).

2.9.2 Ação Microbilógica

É um processo que atenua a percolação gasosa em meios porosos, como é o caso de aterro de resíduos urbanos (RSU).

2.10 Modelos de Produção de Biogás em Aterros Sanitários de Resíduos Urbanos (RSU)

A modelagem e previsão das taxas de produção de biogás em aterros sanitários, torna-se necessária devido ao potencial de migração para a atmosfera, ocasionando problemas ambientais.

O desenvolvimento de modelos experimentais de cálculos de emissões em aterros teve seu início nos anos 70, quando alguns pesquisadores realizaram experimentos com valores em bases reais - Alpern, 1973; Boyle, 1976; Ham et al., 1979.(CHRISTENSEN et al., 1996).

Modelos qualitativos foram desenvolvidos por Farquhar and Rovers (1973), e modelos qualitativos foram desenvolvidos nos Estados Unidos nos aterros sanitários de Palos Verdes, Scholl Aanyon e Sheldon Arleta models.(CHRISTENSEN et al. , 1996)

Segundo Marsili-Libelli (1989), os modelos podem ter diferentes classificações, que estão baseadas nas avaliações dos valores e no estado de conhecimento do sistema, conforme demonstrado na Ilustração 2.8. (CHRISTENSEN et al. , 1996)

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 2-10 Classificação dos Modelos baseados no Nível de conhecimento e na Avaliação de Valores

Fonte: Marsili-Libelli, (1989)

Os níveis acima apresentados na Ilustração 2.10, são descritos:

- **I Análise Estatística:** quando um grande número de valores é conhecido, mas o conhecimento do sistema é inadequado, e os valores são coletados por diferentes maneiras; esta espécie de modelo não assume qualquer relação causa efeito ou relação como o sistema dinâmico temporal, mas apresenta uma característica geral para valor de população e valores correlatos;
- **II Método Estocástico:** quando descreve a tendência temporal dos valores sem explicar o mesmo; esta espécie de modelo é usual para descrever o comportamento para um sistema fechado; um estado com a saída relacionada com a espécie de entrada;
- **III Modelos Determinísticos Simplificados:** quando requer conhecimento do mecanismo que governa o sistema, é capaz de descrever o comportamento par o sistema com equações matemáticas simplificadas;
- **IV Modelos Determinísticos Complexos:** quando ações de um modo similar para o modelo acima descrito, utiliza modelos matemático complexos.

A maioria dos modelos para determinar a produção de biogás é baseada no Modelo Determinístico Simplificado. Estes modelos são ainda divididos em modelos estáticos e modelos dinâmicos.

Em modelos estáticos têm-se uma relação instantânea entre entrada e saída; o mecanismo do sistema não memoriza valores de entrada e saída, sendo o estado do sistema estacionário, e não há influência do tempo.

Em modelos dinâmicos a relação entre entrada e saída não é instantâneo e a variação do estado que descreve a evolução temporal para o sistema deve ser introduzido.

Segundo Andreottola and Cossu (1988), os modelos de cálculos de geração de biogás podem ser também conceituados em outras classes:

- **Modelos empíricos:** como um modelo de caixa-preta, no qual o sistema é caracterizado por valores de entrada e saída, e a função matemática que descreve os valores de entrada e saída são baseadas em séries de valores temporais;
- **Modelos Estequiométricos:** são baseados em reações estequiométricas globais, quando o lixo é representado por uma fórmula empírica, geralmente esta espécie de modelo traduz o maior potencial de rendimento do biogás;
- **Modelos Bioquímicos:** consideram a biodegradabilidade para os diferentes componentes do lixo, e cada uma dos diferentes termos da expressão cinética, número de espécies de substratos e parâmetros.
- **Modelos Ecológicos:** possuem interação com o ecossistema baseado e descrito na interação dos sistemas componentes do mesmo. É um dos mais complexos sistemas.

2.11 Taxas de Geração de Biogás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

O maior problema para modelar a produção de biogás não é somente determinar a quantidade de biogás que pode ser produzido, mas também a taxa de duração desta produção.

A Ilustração 2.11 geral que rege esta produção é:

$$\frac{dC}{dt} = f(t, C^n)$$

Ilustração 2-11: Equação da Produção de Biogás
Fonte: Zison, 1990

Onde:

t = tempo

C = é a quantidade de CH₄ e CO₂ uqe será avaliada neste trabalho

Esta Equação 2.11 pode demonstrar a taxa para a degradação do substrato ou a taxa de produção do biogás.

A maioria dos modelos de produção de biogás, a equação acima é aplicada para uma simples quantidade de resíduo, ou quando corresponde a uma quantidade de resíduo disposto por um período pequeno ou anual.

O valor absoluto do expoente *n* dependente da variável C e é denominado modelo de ordem cinética.

O modelo cinético da ordem zero significa que um pequeno incremento (positivo ou negativo) de C não influencia na taxa de decaimento do substrato ou da produção de biogás. Em outras palavras, o modelo cinético de ordem zero indica que a taxa de geração do metano é independente da quantidade de substrato remanescente ou da quantidade de biogás realmente gerada.

De acordo com alguns autores, muitos Aterros Sanitários, possuem a produção de biogás da ordem zero, especialmente durante o período de maior atividade de geração do biogás.

A maioria dos modelos de cálculo de emissão de biogás, seguem uma produção de cinética de primeira ordem, o que significa que o fator limitante é a quantidade de substrato ou a quantidade de biogás já produzidos. Desta forma, outros fatores como umidade ou disponibilidade de nutrientes não são supostos para serem os fatores limitantes.

Atualmente a maioria dos casos de cinética de primeira ordem o fator limitante é a quantidade de água contida na matéria orgânica.

Embora já citado anteriormente que muitos fatores, tais como umidade, temperatura, disponibilidade de nutrientes e presença de micro-organismo é necessário na influência na produção de biogás, a maioria dos autores acreditam que a cinética de primeira ordem em relação ao substrato é o mais adequado. Esta escolha parece ser apoiada pelo fato que diminui progressivamente a produção de biogás em longo prazo.

A Tabela 2.5 demonstra alguns exemplos de equações decorrentes Equação 2.11 a partir de um lote de resíduos (Zison, 1990).

A taxa constante (k_1 , k_2 , ..., k_i) indicados na Tabela 2.5 controla a taxa em que decai o substrato e a produção de biogás. Quando medidas temporais de campo são realizadas, estas constantes são normalmente estimados pelo modelo de calibração.

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Modelos	Forma de Integração	Ordem	Comentário
1. $\frac{dCi}{dt} = -k$	$C_2 = C_1 - k(t_2 - t_1)$	0	Consumo de substrato é constante; A taxa de produção do metano é constante.
2. $\frac{dCi}{dt} = -kt$	$C_2 = C_1 - k \ln \frac{t_2}{t_1}$	0	Decai a taxa ao longo do tempo; A taxa de produção do metano decai ao longo do tempo.
3. $\frac{dCi}{dt} = -kC$	$C_2 = C_1 \exp[k(t_2 - t_1)]$	1	O decaimento do substrato é exponencial
4. $\frac{dCi}{dt} = -\frac{kC}{t}$	$C_2 = C_1 \exp\left(k \frac{t_2}{t_1}\right)$	1	Combinação dos modelos 2 e 3
5. $\frac{dGi}{dt} = -k_1 G$ $\frac{dLi}{dt} = -k_2 L$	$G = \frac{L_0}{2} \exp[-k_1(t_h - t)]$ $L = \frac{L_0}{2} \exp[-k_2(t - t_h)]$	1	Modelo de dois estágios. A taxa de geração do gás aumenta quando do decaimento, a taxa máxima de produção ocorre num tempo t_h

Tabela 2-5 Equações que regem a produção de biogás

Fonte: Zison, 1990

Onde:

C_1 = concentração do substrato em um tempo t_1 ;

C_2 = concentração do substrato em um tempo decorrido t_2 ; $C_2 \geq 0$;

C_i = concentração do substrato i , não demonstrado na integral, pois deve ser estudado caso a caso;

G = volume do gás produzido em um tempo t ;

L = volume do gás após um tempo decorrido; L_0 é o total do gás produzido;

t_h = tempo que indica a metade da produção do biogás;

k_1, k_2, k_3 = taxas de constante de decaimento.

O **Modelo 1** é muito simples: o processo de degradação do substrato é independente da quantidade restante. A produção de biogás é constante até que toda a matéria biodegradável é degradada. Trata-se de uma simplificação do processo.

No **Modelo 2**, tem-se um excesso de substrato e este não limita a taxa de produção do biogás. No entanto, a taxa diminui porque os resíduos depositados no aterro são compostos de substratos heterogêneos de diferentes classes de matéria biodegradável, sendo que cada uma possui a sua própria taxa de atenuação, de modo que a menor taxa de biodegradabilidade é a que diminui mais rapidamente.

Modelo 3 é típico, simples, de primeira ordem com relação ao modelo do substrato, a bio-disponibilidade é o fator limitante. A taxa de consumo depende da quantidade de substrato restante. Este modelo assume que outros fatores não influenciam o processo

No **Modelo 4**, de acordo com Zison, 1990, é uma combinação do modelo 2 e do modelo 3: este modelo pressupõe que a disponibilidade do substrato é o fator limitante e que a taxa de produção diminui com o tempo.

Modelo 5 é um modelo em duas fases. Na primeira fase, a taxa de produção de biogás é proporcional à quantidade de biogás produzida, enquanto na segunda fase, a taxa é supostamente proporcional à quantidade de biogás que foi produzido. Para evitar o consumo de substrato presente inicialmente na primeira fase, a quantidade inicial de gás produzido é igual a zero, portanto assume que a fase 1 começa após a produção de 1% do rendimento final de gases. Este modelo é do tipo utilizado por EMCOM no Aterro sanitário de Palos Verde. (EMCON, 1980)

2.12 Tempo de Geração do Biogás

Um dado importante sobre a produção do biogás é o período durante o qual é produzido, normalmente chamada de tempo de geração. Alguns autores apresentam em seus trabalhos tempos de produção diferenciados. Andreottola e Cossu (1988) indicou um período de geração de biogás por até 30 anos. Uma geração de tempo de 20 anos foi citado por Brifgewater e Lidgren (1981); já os autores Ham (1989) e Richards (1989a) sugeriram um período de 10 a 15 anos. .(CHRISTENSEN et al. , 1996)

A Tabela 2.6 demonstra o tempo de geração e as taxas produzidas de biogás de diversos autores.

Fonte	Produção de biogás (m ³ /ton de lixo)	Taxas de produção de Biogás (m ³ /ton ano)
Rhyne (1974)	437	
EMCON (1976)		1,22 (metano)
Tabasaran (1976)	60-180	
Rash (1976)	300-500	
Augustein et al. (1976)	128	
Bowerman et al (1977)	40-50	
Revers et al (1977)		12-22
Rettenberger (1978)	200	
Stegmann (1978)	250	
Ham (1979)	440	16
Pacey (1981)	55-225	
EMCON (1981)		9,6
Stegmann (1986)	186-235 (USA)	12,8 (Palos Verdes)
	120-150 (Germany)	18,6 (Fresh Kills)

Tabela 2-6 Tempo de Geração e as Taxas Produzidas de Biogás
Fonte Adaptado de Gendebien et al., 1992

Informações sobre a geração do biogás pelo tempo é fornecida pela meia vida ($t_{1/2}$), que significa o tempo durante o qual a geração de biogás é igual à metade do rendimento. (Ilustração 2.11).

Ilustração 2-12 Taxa de Geração do Metano e Tempo de Decaimento
Fonte : Adaptada de Andreottola e Cossu (1988)

Por definição, o tempo de decaimento ($t_{1/2}$) é tal que área sob a curva geração é a mesma em ambos os lados. A gama de valores propostos para ($t_{1/2}$) é muito grande. Augestein e Pacey (1991) relataram valores variando entre 2-5 anos para áreas húmidas e entre 10 a 25 anos para climas secos na E.U.A.. O tempo de decaimento também pode ser calculado em modelos cinéticos de primeira ordem pela seguinte Ilustração 2.13:

$$t_{1/2,i} = \ln \frac{2}{k_i}$$

Ilustração 2-13 : Tempo de Decaimento

Onde : k_i é a taxa da constante de decaimento para o i componente orgânico contido no lixo.

Hoeks (1983), estima a taxa de degradação da matéria orgânica utilizando um modelo cinético simples de primeira ordem descrita pela Ilustração 2.14: .(CHRISTENSEN et al. , 1996)

$$\frac{dP_t}{dt} = -kP_t$$

Ilustração 2-14: Taxa de degradação
 Fonte: CHRISTENSEN et al. , 1996

Onde:

P_1 = concentração da matéria orgânica degradável no tempo t ;

k = constante de degradação;

t = tempo.

Integrando a Ilustração 2-14 temos:

$$P_1 = -P_0 e^{kt}$$

Ilustração 2-15: Taxa de Degradação

Quando P_0 é a concentração da matéria orgânica degradável em um tempo $t = 0$.

Os valores de P_0 e k são estimados para três classes de resíduos orgânicos biodegradáveis:

1. Facilmente degradável: $P_0 = 120 \text{ kg/t}$, $k = 0,693 \text{ ano}^{-1}$
2. Moderadamente degradável: $P_0 = 120 \text{ kg/t}$, $k = 0,139 \text{ ano}^{-1}$
3. Lentamente degradável: $P_0 = 160 \text{ kg/t}$, $k = 0,046 \text{ ano}^{-1}$

A primeira classe – facilmente degradável – (alimentar), é assumido com sendo 30% em peso, de resíduos orgânicos, enquanto que a segunda classe – moderadamente degradável – (jardim) assume um valor de 30% em peso de resíduos de jardinagem, e, a terceira classe – lentamente degradáveis – (papel, têxteis), assume um valor de 40% em peso.

Neste modelo, uma primeira fase de aumento da taxa de produção é considerada muito curta e, portanto, insignificante.

2.13 Metodologia de Investigação In Situ

Os principais métodos para medir as emissões de gás que atravessam a camada de cobertura de aterros de resíduos sólidos urbanos são: placa de fluxo dinâmico, placa de fluxo estático e análises por sistema infravermelho. Estes métodos têm o objetivo de avaliar a eficiência dos sistemas de fechamento destes aterros, quantificarem a fonte poluidora global em relação ao fluxo de biogás.

A placa é uma câmara fechada, que restringe a passagem de biogás liberado pelo solo para a atmosfera, de modo que as mudanças de concentração do biogás dentro da câmara possam ser medidas. Para isso, amostras de ar do interior da câmara são coletadas em intervalos de tempo previamente determinados, sendo a variação na concentração dos gases quantificadas *in situ*, quando do uso de aparelhos específico, ampolas de coleta de gases e posteriormente analisados em laboratório, por infravermelho ou cromatografia gasosa.

A partir da variação da concentração dos gases no tempo, estima-se o fluxo ou influxo de gases no sistema solo-atmosfera (HUTCHINSON et. al.,1993; COSSU et. al 1997 ; MACIEL, 2003).

No ensaio de placa de fluxo dinâmica os gases no interior da placa são diluídos por meio de um fluxo contínuo de ar para serem analisados e depois lançados para a atmosfera, enquanto que no ensaio de placa de fluxo estática os gases são analisados sem diluição e retornam para a própria placa após a passagem pelo equipamento de leitura em um ciclo fechado. A Ilustração 2.16 apresenta de forma esquemática os ensaios de placa de fluxo estática e dinâmica.

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 2-16 Ensaios de Placas de Fluxo Estáticas e Dinâmicas
Fonte : Maciel (2003)

As vantagens e desvantagens de cada um dos ensaios das placas de fluxo, é de fundamental importância para escolher a melhor técnica a ser seguida:

Placas de fluxo (estática ou dinâmica):

- **Vantagens:** mais preciso na determinação da emissão pontual, larga experiência prática, baixo custo, simples instalação, necessita mão de obra pouco especializada, possibilidade de determinar parâmetros do solo de cobertura (permeabilidade, densidade, umidade, temperatura, etc), permite avaliação simultânea de diversos gases.
- **Desvantagens:** necessita de inúmeros ensaios para obtenção da emissão total do aterro, duração do ensaio prolongada a depender das dimensões da placa e possibilidade de modificação das características da cobertura na cravação.

Análises por infravermelho:

- **Vantagens:** mais preciso na obtenção da emissão total do aterro cobrindo rapidamente vários hectares e passível de localizar dispersão da pluma de contaminação.
- **Desvantagens:** alto custo, tecnologia nem sempre disponível, necessita mão de obra qualificada, não identifica as causas reais da emissão (solo mal compactado, presença de fissuras ou aumento da pressão dos gases sob a camada, etc.), maior susceptibilidade as condições meteorológicas (velocidade do vento, pressão atmosférica), número de gases analisados limitados (normalmente, só o metano).

A Tabela 2.7 apresenta a forma (retangular ou circular) e dimensões de algumas placas de fluxo encontradas na literatura. É possível verificar nesta Tabela 2.7 que existe uma grande variação na área da base ($<0,01$ à $0,79 \text{ m}^2$) e no volume ($0,25$ à 159 litros) das placas, permitindo-se então afirmar que não existe consenso no meio científico sobre a forma e o tamanho ideal das mesmas.

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Autores	Geometria da Placa	Dimensões (cm)		Área (m ²)	Volume (litros)
		Base	Altura		
Rolston (1986)	circular	Ø 88,0	17,0	0,61	103,4
Jones e Nedwell (1993)	retangular	21,5 x 24,5	7,5	0,05	4,0
Kjeldesen e Fisher (1995)	circular	Ø 57,0	5,0	0,25	12,7
Czepiel et al. (1996)	N.I.	N.I.	18,2	0,05	9,3
Boekx et al. (1996)	circular	Ø 15,0	60,0	0,02	10,6
Christensen et al. (1996)*	retangular	20,0 x 70,0	21,5	0,14	30,0
Borjesson e Svensson (1997)	retangular	45,0 x 45,0	25,0	0,21	51,3
Cossu et al. (1997)	circular	Ø 50,0	20,0	0,79	157,0
Tanaka et al. (1997)	circular	Ø 20,0	16,5	0,03	5,0
Park e Shin (2001)	circular	Ø 40,0	30,0	0,13	40,0
Maurice e Lagerkvist (2002)	circular	Ø 29,0	24,0	0,07	15,9
Maurice e Lagerkvist (2002)	retangular	44,0 x 44,0	13,0	0,19	25,2
Lindenberg et al. (2002)*	retangular	20,0 x 60,0	20,0	0,12	24
Lindenberg et al. (2002)*	retangular	10,0 x 30,0	10,0	0,03	3,0
Lindenberg et al. (2002)*	circular	Ø 9,6	3,5	< 0,01	0,25
Lindenberg et al. (2002)*	circular	Ø 24,0	9,0	0,04	4,1

Tabela 2-7 Formas e Dimensões de Placas de Fluxo Dinâmicas e Estáticas

Fonte: Maciel (2003)

Obs.: placas de fluxo dinâmicas; Ni: não informado

2.14 Emissões de gases em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos

A Tabela 2.8 apresenta os valores de fluxo de CH₄ medidos por meio de placa de fluxo estática informando também o local do estudo e a idade do resíduo depositado (MARIANO, 2008).

REFERÊNCIA	FAIXA DE EMISSÃO DE CH ₄	TIPO DE ENSAIO	LOCAL	IDADE DO RESÍDUO DEPOSITADO (anos)
Chanton et al. (2007)	13,8 – 26 g/m ² d	Placa	EUA	N.I.
Chanton et al. (2007)	17,7 – 35,4 g/ m ² d	Laser	EUA	N.I.
Modrak et al.	13 – 52 g/ m ² d	Laser	EUA	N.I.
Simon & Müller (2004)	10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁵ m ³ /m ² s	Placa	Alemanha	N.I.
Akeman et al. (2007)	0,004-12,2 g/ m ² d, valor médio encontrado 2,31 g/ m ² d	Placa	UK	0 a 40 anos
Akeman et al. (2007)	0,004-0,43 g/ m ² d Valor médio encontrado 0,032 g/ m ² d	Placa	UK	4 a 24 anos
Akeman et al. (2007)	10,7 g/ m ² d	Placa	França	1 a 7 anos
Akeman et al. (2007)	16,8 g/ m ² d	Placa	França	1 a 7 anos
Akeman et al. (2007)	6 g/ m ² d	Placa	França	1 a 38 anos
Maciel (2003)	103 a 363 g/ m ² d	Placa	Brasil	N.I.
Bogner (2003)	78,29 g/ m ² d	Placa	Brasil	N.I.
Morcet et el. (2003)	56 a 287 g/ m ² d	Placa	Brasil	N.I.

Tabela 2-8 Fluxo de CH₄ em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos

Fonte: Adaptada de Mariano, 2008

Obs: N.I.: não informado

2.15 Metodologias para estimativa teórica de geração de biogás em aterros de resíduos sólidos urbanos

2.15.1 United States Environment al Protection Agency - USEPA

Em USEPA (1996a), é apresentado um método conhecido como *Aproximação Simples*, que utiliza a Ilustração 2.17 para estimativas de produção de biogás. Este método possui uma única variável, que é a quantidade de resíduos.

$$E_{CH_4} = Gr.MSWd$$

Ilustração 2-17 Estimativa de Produção do Biogás

Fonte: USEPA, 1996a

Sendo:

E_{CH_4} : geração anual de gás metano (m³/ano);

Gr: geração de gás metano por quantidade de resíduos (m³/kg ano). USEPA (1996a) sugere taxas de geração de 0,312 a 1,249 (m³/kg ano);

MSWd: quantidade de resíduo disposto (kg).

Esta metodologia exige bastante cautela, devido à falta de precisão, pois não há considerações da redução da quantidade de gás ao longo do tempo. Entretanto, pode ser utilizada como ponto de partida em um projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

2.15.2 Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC

O IPCC (1996) apresenta um método de cálculo mais detalhado que o método anterior. É descrito pela Ilustração 2.18:

$$E_{CH_4} = (MSW_T * MSW_F * L_0 - R) * (1 - OX)$$

Ilustração 2-18 Cálculo IPCC

Fonte: IPCC, 1996

Sendo:

E_{CH_4} : emissão de gás metano (tCH₄/ano);

MSW_T : total de resíduos dispostos no ano (t/ano);

MSW_F : fração de material orgânico no resíduo (%);

L_0 : potencial de geração de metano (relação de t de CH₄/t de resíduo);

R : metano capturado (CH₄)/ano);

OX : fator de oxidação de metano na superfície do aterro.

Esse método envolve a quantidade de material orgânico degradável presente nos resíduos e permite, assim, o cálculo da quantidade de biogás e, consequentemente, do gás metano a ser gerado. A Ilustração 2.18 considera as possíveis emissões para a atmosfera, entretanto, no que se refere aos cálculos que os gases poderão ser capturados, deverá ser considerado o índice R igual a zero.

Para precisão dos cálculos, são necessárias avaliações de dados históricos e estatísticos da característica dos resíduos sólidos urbanos. O potencial de geração de metano (L_0), conforme apresentado na Ilustração 2.18, pode ser obtido conforme a Ilustração 2.19.

$$L_0 = FCM * COD * CODf * F * 1,33$$

Ilustração 2-19 Potencial de Geração do Metano
Fonte: IPCC, 1996

Sendo:

FCM : fator de correção de metano;

COD : carbono orgânico degradável (tC/tMSW);

$CODf$: fração de Cod dissociada (valor padrão = 0,77);

F : fração em volume de metano no gás gerado (valor padrão = 0,50);

1,33: fator de conversão de carbono em metano (tCH₄/tC).

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

O fator de correção de metano (FCM) avalia a qualidade do confinamento dos resíduos depositados: a disposição, a posição e a forma de fechamento. A Tabela 2.9 apresenta os valores recomendados pelo IPCC (1996) para o fator FCM.

Tipo de Encerramento	FCM – Fator de Correção
Adequado	1,0
Inadequado para Aterros profundos (>5 m de lixo)	0,8
Inadequado p/ Aterros rasos (< 5 m de lixo)	0,4

Tabela 2-9 Fator de Correção do Metano para a Geração de Biogás em Aterros Sanitários

Fonte: IPCC (1996)

Ainda IPCC (1996) sugere o tipo de encerramento está “adequado” quando há a presença de um material de cobertura eficiente (argila compactada mecanicamente), nivelamento do terreno (taludes não-ingremes), quantidade de poços instalados, profundidade das células e um sistema eficiente de coleta de percolado.

Para estimar a quantidade de carbono orgânico degradável (COD) deve-se utilizar a Ilustração 2.20.

$$COD = (0,4 * A) + (0,17 * B) + (0,15 * C) + (0,30 * D)$$

Ilustração 2-20 Quantidade de carbono Orgânico Degradável

Onde os índices A, B, C e D se referem às frações dos componentes principais encontrados em uma série de amostras de resíduo. Os valores multiplicadores são os índices de carbono degradável para cada material, conforme segue Tabela 2.10. O IPCC (1996) sugere para o Brasil valores padrões de 0,12 para o COD

Componente	Porcentagem mássica no composto
Papel, papelão e tecidos	A
Resíduos de parques e jardins	B
Restos de alimentos	C
Madeira	D

Tabela 2-10 Referência para o cálculo de COD

Fonte: Birgermer e Crutzen (1987)

Esta metodologia, entretanto, poderá apresentar imprecisões relacionadas às amostragens de seus dados históricos. Esse método de cálculo pode ser utilizado para avaliar um projeto de aproveitamento energético de acordo com a população existente e as características preliminares do material.

2.15.3 Método de Decaimento de Primeira Ordem

Com a finalidade de padronização mais eficiente de cálculo e a preocupação com as avaliações de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo – MDL, em aterros sanitários, as nações Unidas (UNFCCC), em cooperação com o Painel de Metodologia do IPCC, apresentaram o “*Good Practice Guidance*”, que descreve um método conhecido como “Método do Decaimento de Primeira Ordem”.

Este guia considera a geração do gás metano de acordo com a degradação de resíduo ao longo do tempo, em função das diferentes características dos resíduos em um aterro sanitário. A Ilustração 2.21 apresenta este método.

$$E_{CH_4} = \sum \left[L_{0(x)} * MSW_{T(x)} * MSW_{F(x)} * A * k * \left(e^{-k(t-x)} \right) \right]$$

Ilustração 2-21 Método *Good Practice Guidance*

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

sendo:

E_{CH_4} : geração de metano no ano (t/ano);

t: ano inicial de disposição ou de cálculo inicial;

x: ano de interesse para o qual deverá inserir os dados;

A: fator de correção da somatória [$A=(1-e^k)/k$];

MSW_T : total de resíduo depositado no aterro no ano x (t);

MSW_F : fração de matéria orgânica no resíduo no ano x (t);

k: constante de decaimento (ano^{-1});

$L_0(x)$: potencial de biogás gerado.

A somatória representa a quantidade de metano gerado até o ano desejado “x”. Se “x” for o tempo de encerramento e “t” o início da disposição do resíduo, a Equação 2.11 apresentará o montante de biogás gerado na vida útil do aterro sanitário.

A constante de decaimento (k) está relacionada com o tempo necessário para a fração de COD de o resíduo decair para metade de sua massa. Para o IPCC (2006) esta constante é estabelecida conforme a Ilustração 2.22:

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

Ilustração 2-22 Constante de Decaimento

Sendo:

k: constante de decaimento (ano^{-1});

$t_{1/2}$: tempo para a fração de COD decair em metade da massa (anos).

Entretanto o valor de “k” depende de vários fatores: teor de umidade do resíduo, a disponibilidade dos nutrientes e o pH. Em geral, teores de umidade até 60% e pH ente 6,6 e 7,4 promovem o aumento dessa constante. Os valores encontram-se dentro de uma faixa de 0,03 a 0,20/ano (IPCC, 2006).

3 EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Este trabalho procurou demonstrar uma metodologia para o cálculo de emissão do biogás através da superfície do aterro sanitário de São Carlos, de maneira a quantificar a quantidade emitida de CH_4 e CO_2 , mapeadas através de coordenadas geográficas. A metodologia utilizada foi a demonstrada no Capítulo 21.

Ilustração 3-1 Foto de Satélite do Aterro Sanitário de São Carlos
Fonte: Google earth (2009)

3.2 Descrição do Aterro Sanitário de São Carlos

3.2.1 Localização e Acesso

O aterro localiza-se na Fazenda Guaporé, distante aproximadamente 15 km do centro da cidade de São Carlos e tem acesso pela Rodovia Washington Luiz.

3.2.2 Tipo de Aterro

O Aterro Sanitário de São Carlos foi executado abaixo do nível original do terreno, em escavações oriundas de erosões ocorridas em áreas da Fazenda Guaporé e Fazenda Embaré. Como cada erosão dista da outra aproximadamente 200 metros, tem-se na realidade dois aterros sanitários, denominados AS-1 e AS-2, de idêntica concepção.

Ilustração 3-2 Área em planta dos sub-aterro AS-1 e AS-2

3.2.3 Área

O aterro AS-1, possui uma área superficial de 110.000 m² e o AS-2 uma área de 70.000 m², totalizando um total de 180.000 m². Foi realizada mais uma expansão, no cume da área AS-1.

3.2.4 Topografia

As áreas dos Aterros AS-1 e AS-2, constituem-se em escavações resultantes de antigas erosões já estabilizadas. Suas dimensões são bastantes variadas, tanto no que se refere à largura como na altura, apresentando taludes com inclinações muito próximas a 90°. Essas características tornaram obrigatório a realização de determinadas obras de preparação que facilitaram o desenvolvimento do aterro em condições operacionais seguras e eficientes. Porém não trazem qualquer influência na realização deste trabalho. (FILSAN ENGENHARIA E SERVIÇO S/A, 1989).

3.2.5 Idade e Vida Útil do Aterro

As capacidades volumétricas, bem como a vida útil de cada camada dos dois sub aterros, com início considerado em janeiro de 1989, de acordo com o Projeto da Filsan Engenharia e Serviço, são apresentadas na Tabela 3.1.

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Sub Aterro	Camada	Capacidade Volumétrica (m ³)	Vida Útil (meses)
AS-1	1 ^a	29.220	7,4
	2 ^a	38.958	9,8
	3 ^a	32.944	8,2
AS-2	1 ^a	36.386	8,7
	2 ^a	86.726	20,0
Total		224.234	54,1

Tabela 3-1 Capacidade Volumétrica e Vida útil do Aterro Sanitário
Fonte : Filsan Engenharia e Serviço (1989)

Em função de dificuldades para a localização de nova área para instalação do novo aterro sanitário, foram realizadas ampliações dentro do próprio aterro.

Segundo informações do Engenheiro Douglas Comparotto Minamisako – Chefe da Divisão de Gestão de Resíduos Sólidos, até agosto de 2007 houve depósito de resíduos. Desta data até setembro de 2008, foi realizado transbordo do lixo para Guataporã, não sendo depositado resíduos no aterro. Em setembro de 2008, iniciou-se o depósito de lixo na última ampliação localizada ao lado da área AS-1, com previsão de encerramento em outubro de 2010.

A quantidade de lixo depositada no Aterro Sanitário de São Carlos, segundo informações do Engenheiro Douglas Comparotto Minamisako – Chefe da Divisão de Gestão de Resíduos Sólidos é de 557.823,03 ton na “Parte Antiga” – AS-1, e de 51.075,16 ton na “Parte Nova” – Ampliação.

3.2.6 Quantidade de Lixo Gerado

O volume de lixo a ser depositado no aterro foi calculado a partir da previsão de crescimento populacional e do índice de produção “per capita” obtidos para o município, sendo hoje este valor de 157 t/dia de lixo (MINAMISAKO, 2009).

3.2.7 Memorial Descritivo do Aterro Sanitário

3.2.7.1 Instalações de Apoio

As instalações de apoio são estruturas auxiliares que têm por objetivo garantir o funcionamento do aterro sem solução de continuidade e dentro dos padrões estabelecidos pela técnicas de engenharia e de saneamento ambiental. No Aterro Sanitário de São Carlos são constituídas por: (MINAMISAKO, 2009)

- Cercas – têm como função o controle de entrada e saída, além de ser garantido o isolamento do mesmo da presença de animais ou da atuação de catadores;
- Portaria – instalação de controle e anotação da entrada e saída de resíduos e outros materiais do aterro;
- Prédio para estocagem de materiais;
- Acessos Internos – têm como função garantir a chegada de veículos às frentes de operação;
- Iluminação;
- Infra estrutura – portaria, vigias, almoxarifado, balança.

3.2.7.2 Sistema de Drenagem de Líquidos Percolados

Tem por objetivo coletar os líquidos percolados do lixo depositado no aterro, que tendem a infiltrar-se no solo contaminando as águas do sub solo.

No aterro em questão foi executado uma linha de drenos de brita, com dimensões mínimas de 0,40 x 0,40 m, escavada na camada de terra colocada sobre a camada de impermeabilização de fundo. Este dreno é aberto na linha central do fundo das valas a serem aterradas, na convergência das declividades da camada de impermeabilização, facilitando desta maneira, a remoção desses líquidos para fora da área.

3.2.7.3 Sistema de Tratamento de Líquidos Percolados

No aterro sanitário de São Carlos, optou-se pelo “Sistema Australiano” de lagoas de oxidação, ou seja, um conjunto composto por uma lagoa anaeróbia e uma facultativa, para o tratamento desses líquidos. Estas lagoas foram escavadas diretamente no solo e toda a superfície de escavação impermeabilizada por uma camada de solo argiloso de 0,5m de espessura. A técnica de execução dessa impermeabilização é similar à utilizada nas valas para aterramento dos resíduos.

Devido à diferença de nível entre a cota de saída dos drenos de líquidos e a lâmina das lagoas, essas funcionam por gravidade, sem a necessidade, portanto, de utilização de bombas.

Segundo informações do Engenheiro Douglas Comparotto Minamisako – Chefe da Divisão de Gestão de Resíduos Sólidos, o aterro conta hoje com três lagoas de chorume, com um volume de 27.000m³.

3.2.7.4 Sistema de Drenagem de Gases

É realizado através de um sistema de drenagem, constituído pela superposição vertical de tubos perfurados de concreto, revestidos por uma camisa de brita. Os gases são incinerados. A Ilustração 3.3 mostra um queimador de gás existente no aterro.

Ilustração 3-3 Queimador de biogás

3.2.7.5 Corte esquemático do Aterro Sanitário

A Ilustração 3.4 mostra um corte esquemático de um aterro sanitário, onde se pode observar detalhes da captação do líquido percolado (chorume), e do biogás produzido, bem como detalhes da impermeabilização do solo.

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 3-4 Corte esquemático de um Aterro Sanitário

3.3 Instrumentação

3.3.1 GEM 2000 – Detector de Gases

As medidas realizadas em 2008 foram efetuadas com o aparelho GEM 2000, Figura 3.5, fabricado pela LANDTEC. O princípio de detecção do CH_4 e do CO_2 é por célula dupla de comprimento de onda por infravermelho com material de referência.

Ilustração 3-5 Características físicas do GEM 2000

Fonte: Manual Técnico Landtec (2005)

Este equipamento apresenta um canal de entrada e outro de retorno ou liberação dos gases, permitindo assim que os ensaios da placa utilizadda neste trabalho fossem realizados, onde o gás é bombeado para o aparelho, analisado internamente e depois lançado a atmosfera.

3.3.2 Termômetro

Para as medidas da temperatura interna da placa, dos queimadores e da temperatura ambiente foi utilizado um termometro digital da marca Minipa, modelo MT – 40 IA, com faixa de leitura de -50°C a 750°C com sensibilidade de $0,1^{\circ}\text{C}$. este aparelho utiliza com entrada um termopar K (Ilustração 3.6).

Ilustração 3-6 Termômetro Digital

3.3.3 GPS

As medidas foram localizadas globalmente para identificação espacial das fontes geradoras de biogás. Para estas localizações foi utilizado um GPS modelo eTrex Vista, da marca Garmin (Figura 3.7).

Ilustração 3-7 GPS – etrex – garmin

3.3.4 Ampolas Gasométricas

Este equipamento foi utilizado para as medidas realizadas em 2009, pois a empresa Landtec não tinha como disponibilizar o aparelho GEM 2000 para o período. As ampolas gasométricas são confeccionadas em vidro, com pistão e tampa em alumínio, com a finalidade de armazenamento do biogás destinado à análise cromatográfica, desenvolvidos pela Construmaq São Carlos Ltda (Ilustração 3.8 e Ilustração 3.9).

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 3-8 Ampolas gasométricas

Ilustração 3-9 Ampolas gasométricas – Caixa de Armazenamento

3.3.5 Cromatografia Gasosa

A cromatografia dos gases foi efetuada por meio da retirada de 0,1 mL de amostra da fase gasosa, utilizando seringa “gastight” com trava. Foi utilizado cromatógrafo a gás, Shimadzu GC-2010 (Ilustração 3-10 e 3-11), equipado com detector de condutividade térmica. A coluna utilizada foi a Supelco Carboxen 1010 Plot (30 m de comprimento e diâmetro interno de 0,53 mm) e detector de condutividade térmica e, o gás de arraste foi o argônio sob fluxo de $21,9 \text{ cm s}^{-1}$. As temperaturas do forno, da coluna e do detector foram 30°C , 200°C e 230°C , respectivamente.

Ilustração 3-10 Cromatógrafo GC 2010

Ilustração 3-11 Cromatógrafo GC 2010

3.3.6 Placa de Fluxo Estática

A placa de fluxo estática foi desenvolvida conforme revisão bibliográfica, sendo construída na forma retangular, com aço galvanizado com 2mm de espessura. Na sua parte superior foi instalado uma cobertura de policarbonato com 2mm de espessura, fixada com parafusos e vedante para evitar o escape dos gases.

Na parte superior existem duas conexões de encaixe rápido para retirada das amostras e, uma adaptação para retirada das medidas de temperatura do inteiror da placa durante o ensaio. O volume da placa de fluxo é de $0,039 \text{ m}^3$ e sua área em relação ao solo é de $0,325 \text{ m}^2$ (Ilustração 3.12).

Ilustração 3-12 Placa de fluxo estática

3.4 Dados Climáticos

Os dados de precipitação foram adquiridos no banco de dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE e ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, para a estação de São Carlos, localizada na Latitude -22 e Longitude -47, sendo representativa para a localização do Aterro Sanitários de São Carlos.

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

As medidas não foram realizadas durante dias de chuva, sendo realizadas no período de julho de 2008 e igual período no ano de 2009. Procurou-se realizar as medidas nos períodos matutinos e vespertino, durante dias ensolarados e nublados, com a temperatura ambiente variando ente 21 e 27°C.

As Ilustrações 3-13, 3-14, abaixo demonstram as quantidades pluviométricas referentes aos anos de 2008 e 2009.

Ilustração 3-13 Precipitação Mensal ref. Ano 2008

Fonte: INMET (2008)

Ilustração 3-14 Precipitação Mensal ref. Ano 2009 até Agosto

Fonte: INMET (2009)

3.5 Metodologia

Para a determinação dos fluxos de CH_4 e CO_2 através da cobertura do aterro Sanitário foram realizadas vinte e uma medidas. Não foram realizadas medidas nos queimadores, em função do estado em que se encontravam, sendo apenas três em condições de realização de medidas, mas localizados em áreas mais antigas. As datas de realizações dos ensaios foram nos dias 1,3,5,8,10,12,15 17 e 19 de julho de 2008 e, em 2,3,7,9,14,16,18,23,25,28 e 30 de Julho de 2009.

O local de aplicação da placa de fluxo foi baseado nos seguintes critérios:

- Na área considerada mais antiga, foram realizadas dezoito medidas, abrangendo todos os níveis do talude;
- Na área considerada nova, foram realizadas três medidas, somente sobre a superfície, pois os queimadores ainda estão em fase de construção;
- Áreas em que não havia incidência de erosão (parte nova e antiga);

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

- Áreas planas para melhor fixação da placa de fluxo, facilitando assim o contato placa-solo;
- Não foram realizadas medidas em dias chuvosos (devido as dificuldades técnicas – chuva e barro).

Para que fossem realizadas as medidas no mesmo local, foi utilizado um GPS para a identificação das coordenadas geográficas, precisando assim o mesmo local para as comparações de variações de fluxo da emissão do biogás, entre os anos de 2008 e 2009 (Ilustração 3-15)

Ilustração 3-15 Pontos de medidas demarcados com o GPS

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

A Tabela 3.2 demonstra as coordenadas de cada ponto.

Pontos	Coordenadas	Altitude (m)
1	W 47,921427°S 21,949474°	685,78
2	W 47,921830°S 21,949588°	691,55
3	W 47,921134°S 21,949452°	696,12
4	W 47,920723°S 21,949401°	693,95
5	W 47,920328°S 21,950395°	705,49
6	W 47,920481°S 21,950291°	709,90
7	W 47,920406°S 21,949814°	722,07
8 Queimador	W 47,920311°S 21,950046°	726,88
9	W 47,920310°S 21,950279°	730,24
10	W 47,920563°S 21,950208°	734,81
11 Queimador	W 47,920583°S 21,950912°	732,40
12	W 47,920996°S 21,950669°	734,57
13	W 47,921238°S 21,950358°	732,40
14	W 47,921066°S 21,950293°	737,21
15	W 47,920654°S 21,949886°	734,94
16	W 47,919844°S 21,951225°	742,74
17 Queimador	W 47,920809°S 21,949402°	740,58
18	W 47,920738°S 21,949413°	742,50
19	W 47,920512°S 21,950271°	715,10
20	W 47,920779°S 21,950201°	719,43
21	W 47,920317°S 21,949850°	721,83

Tabela 3-2Coordenadas dos pontos do GPS
Obs. As medidas nos queimadores foram desprezadas

Medidas

A metodologia aplicada para a realização das medidas constituiu na adoção de intervalos de tempo, sendo a primeira medida decorrida o primeiro minuto após a locação da placa de fluxo e, depois em intervalos de 5 minutos, até decorrer o tempo de 60 minutos.

Borjesson e Svensson (1977), aconselham no máximo 60 minutos. Conforme Bogner et al. (1997), o tempo dependerá do tipo de gás a ser analisado e recomenda um período máximo de 30 minutos para o CH_4 e 2 horas para gases traços. De acordo com Tanaka et. Al. (1997) a taxa de emissão deve ser determinada nos primeiros 25 minutos de ensaio.

3.6 GEM 2000

As medidas realizadas com o aparelho GEM 200 foram executadas instalando-se o aparelho a placa de fluxo e as medidas anotadas em planilha. Os resultados das concentrações de CH_4 e CO_2 apresentados em porcentagem eram imediatos, não sendo necessária a análise cromatográfica das amostras. A Ilustração 3.16 demonstra o procedimento na placa e a Ilustração 3.17 o procedimento nos queimadores.

Ilustração 3-16 Procedimento das medidas com o GEM 2000

Ilustração 3-17 Procedimento das medidas nos queimadores de biogás

3.7 Placa de Fluxo

A placa de fluxo possui formato de degrau, que a princípio seria para ser cravado na camada de cobertura, mas foi observado que a remoção do solo da camada de cobertura alterava a situação original de emissão, e também não criava parâmetros para avaliação da eficiência da camada de cobertura quanto a selagem do aterro.

Para evitar que houvesse escape dos gases para a atmosfera, em relação ao terreno, assim que a placa de fluxo fosse instalada as bordas eram rapidamente seladas com terra.

Segundo Sikar et al.(2006) o interior da placa deve ser “lavado” com ar atmosférico antes de ser instalado sobre a superfície do solo, “descontaminando” seu interior. A análise cromatográfica era realizada em até de 3 horas após a coleta.

As Ilustrações 3-18 e 3-19 demonstram o procedimento para a placa de fluxo com as ampolas gasométricas.

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 3-18 Procedimento de Captura com as Ampolas Gasométricas

Ilustração 3-19 Procedimento de Captura com as Ampolas Gasométricas e a Caixa para Transporte para Análise Cromatográfica.

3.8 Análise das Amostras

As amostras coletadas foram analisadas no cromatógrafo Shimadzu GC-2010, e os resultados das porcentagens constituintes são calculados em função do tempo de retenção e área sob a curva. Os tempos de retenção durante a análise são respectivamente de 7 minutos para o CH₄ e de 12 a 13 minutos para o CO₂. As curvas de calibração do cromatógrafo estão demonstradas nas Ilustrações 3.20 e 3.21. Este procedimento está calibrado pelo Laboratório da Engenharia Hidráulica da USP – EESC – Campus 2.

Ilustração 3-20 Curva característica do CO₂

Ilustração 3-21 Curva característica do CH₄

3.9 Cálculo das Emissões (vazão) de CH₄ e CO₂

3.9.1 Emissão (Vazão) do CH₄

Para o cálculo foi utilizada a quantidade em massa (g) do CH₄, resultante da medida da placa de fluxo quando da concentração final em função do tempo, e em função ainda da área da placa de fluxo:

$$J = \frac{\Delta C}{\Delta t} A_p \quad (g / m^2 \text{ min})$$

Ilustração 3-22 Fluxo Mássico

A massa, em gramas de CH₄ será calculada pelo número de moles:

$$pV = nRT$$

Ilustração 3-23 Equação de Estado dos Gases

$$n = \frac{pV}{RT} \quad (g)$$

Ilustração 3-24 Número de mols

O volume de CH₄ na placa de fluxo é a porcentagem resultante da análise cromatográfica ou da medida do GEM 2000 na concentração final em função do tempo, em função ainda do volume da placa de fluxo. Tomou-se como base a média dos três primeiros ensaios.

3.9.2 Emissão (Vazão) do CO₂

Serão realizados os mesmos cálculos, porém com os dados do CO₂.

3.10 Cálculo de k (Constante de Decaimento)

Será utilizada a metodologia citada no Capítulo 2.

$$P_1 = P_0 e^{-kt}$$

Ilustração 3-25 Constante de Decaimento - Degradabilidade

3.11 Cálculo do Decaimento (meia Vida)

Será utilizada a metodologia citada no Capítulo 2.

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

Ilustração 3-26 Constante de Decaimento

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Introdução

Através dos resultados dos ensaios de campo foram determinadas as emissões de CH_4 e CO_2 do biogás através da camada de cobertura do aterro; a massa do CH_4 e do CO_2 contidas na placa de fluxo durante o ensaio.

4.2 Placa de Fluxo

O cálculo da emissão do biogás – metano e dióxido de carbono – pela superfície do aterro foi calculado no intervalo inicial do ensaio de campo para se obter a maior taxa de percolação dos gases – metano e dióxido de carbono – simulando assim a condição natural em que a cobertura fica em contato com a atmosfera, e consequentemente, ocorrem os gradientes máximos de pressão e concentração, tomando-se a média das primeiras três medidas.

Os resultados obtidos nos ensaios de campo estão no Apêndice, onde são apresentados os valores do tempo de realização de cada medida, sendo, o tempo indicado como “zero” o minuto inicial da primeira medida realizada; a porcentagem de CH_4 e de CO_2 obtidos após a análise cromatográfica (descrita no Capítulo 3), e a temperatura interna da placa para cada amostra colhida.

4.2.1 Resultados da Placa de Fluxo para CH_4 e CO_2

As Ilustrações 4-1 a 4-21 - Concentração x Tempo - apresentam os resultados dos ensaios de campo da placa de fluxo do CH_4 realizadas nos meses de julho de 2008 e julho de 2009.

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-1 Ponto 1

A Ilustração 4-1 mostra a diminuição da emissão de 2009 comparada com 2008. Trata-se da parte mais antiga do aterro, com idade aproximada de mais de 12 anos

Ilustração 4-2 Ponto 2

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-3 Ponto 3

Ilustração 4-4 Ponto 4

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-5 Ponto 5

Ilustração 4-6 Ponto 6

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-7 Ponto 7

Ilustração 4-8 Ponto 8 Flare

A Ilustração 4-8 mostra a emissão no Flare, que não foi utilizada no cálculo deste trabalho.

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-9 Ponto 9

Ilustração 4-10 Ponto 10

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-11 Ponto 11 Flare

Observa-se na Ilustração 4-12 a 4-25 um aumento da emissão. Trata-se da parte nova do aterro, onde ainda está sendo depositado os resíduos.

Ilustração 4-12 Ponto 12

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-13 Ponto 13

Ilustração 4-14 Ponto 14

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-15 Ponto 15

Ilustração 4-16 Ponto 16

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-17 Ponto 17 Flare

Ilustração 4-18 Ponto 18

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-19 Ponto 19

Ilustração 4-20 Ponto 20

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-21 Ponto 21

As Ilustrações 4-22 a 4-42 - Concentração x Tempo - apresentam os resultados dos ensaios de campo da placa de fluxo do CO_2 , realizadas nos meses julho de 2008 e julho de 2009.

Ilustração 4-22 Ponto 1

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-23 Ponto 2

Ilustração 4-24 Ponto 3

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-25 Ponto 4

Ilustração 4-26 Ponto 5

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-27 Ponto 6

Ilustração 4-28 Ponto 7

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-29 Ponto 8

Ilustração 4-30 Ponto 9

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-31 Ponto 10

Ilustração 4-32 Ponto 11

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-33 Ponto 12

Ilustração 4-34 Ponto 13

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-35 Ponto 14

Ilustração 4-36 Ponto 15

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-37 Ponto 16

Ilustração 4-38 Ponto 17

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-39 Ponto 18

Ilustração 4-40 Ponto 19

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

Ilustração 4-41 Ponto 20

Ilustração 4-42 Ponto 21

Comparando as Ilustrações 4-41e 4-42, observa-se que apesar de estarem localizadas na parte nova do aterro, recebendo resíduos, a emissão da 4-42, é bem inferior a da 4-41, isto pode ser explicado que a fase metanogênica ainda não está bem definida.

4.3 Análise dos Gráficos – Concentração x Tempo – Resultantes dos Ensaios da Placa de Fluxo

4.3.1 Ensaios: Ponto 1, 2, 3, 4, 5 e 10

Trata-se dos pontos onde a idade do lixo é mais antiga, praticamente da instalação do aterro, sendo observado que as concentrações tanto do CH₄ como do CO₂ praticamente são nulas, porém os valores encontrados são maiores para o CO₂ em uma proporção de 30% a mais. Esta análise leva a conclusão de que não há praticamente fluxo de biogás pela superfície do aterro, indicando que a compactação do solo pode estar dificultando a emissão (diminuição dos vazios do solo), e, uma atenuação biológica do CH₄ por meio das bactérias metanotróficas.

4.3.2 Ensaios: Pontos 6, 7, 8, e 9

Observa-se que as concentrações nestes pontos são relativamente baixas, e estão localizadas em camadas com idade aproximadamente de 12 anos, e pela literatura já estariam com sua produção de biogás em declínio, contudo foram registradas medidas com aumento da emissão. Isto pode ser entendido pelo depósito de novas camadas e a ampliação do aterro ser ao lado e sobre as camadas mais antigas, ocasionando o fluxo do biogás através do aterro e a conseqüente infiltração de água de chuva e de líquidos percolados (Chorume).

4.3.3 Ensaios: Pontos 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18

As concentrações nestes pontos localizados na “parte antiga” do aterro, e que houve um depósito de lixo sobre o cume do aterro, demonstraram que a ação biológica está ocorrendo, de forma, a ser notado um aumento das mesmas após a sazonalidade de um ano, tempo da realização das medidas.

4.3.4 Ensaios: Pontos 19, 20 e 21

Trata-se dos pontos referentes a última ampliação do aterro, e que só foi possível a realização das medidas no ano de 2009, pois em 2008 a quantidade de lixo depositada ainda era pouco significativa para os testes, e os drenos de biogás ainda não estavam concluídos.

Observaram-se as maiores concentrações dos gases quanto às análises cromatográficas, indicando uma forte ação biológica das bactérias.

4.4 Cálculo das Emissões

O cálculo das emissões dos gases CH_4 e CO_2 foram realizados conforme a metodologia citada no Capítulo 3.

4.4.1 Emissões de CH_4

A Tabela 4.1 apresenta o fluxo mássico da emissão do CH_4 realizado em cada ensaio. Os demais valores são apresentados em Apêndice.

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

PONTO	Julho de 2008	Julho de 2009
	Emissão (g CH ₄ m ⁻² min ⁻¹)	Emissão (g CH ₄ m ⁻² min ⁻¹)
1	0,000 – não houve emissão	0,000 – não houve emissão
2	0,0053	0,0002
3	0,0057	0,0005
4	0,0016	0,0088
5	0,0077	0,0024
6	0,0169	0,0134
7	0,0155	0,0086
9	0,0103	0,0203
10	0,0233	0,0083
12	0,0126	0,0231
13	0,0163	0,0245
14	0,0257	0,0239
15	0,0306	0,0297
16	0,0310	0,0312
18	0,0332	0,0409
19	Não houve ensaio	0,0630
20	Não houve ensaio	0,0624
21	Não houve ensaio	0,0351

Tabela 4-1 Fluxo Mássico da Emissão do CH₄

4.4.2 Emissões de CO₂

A Tabela 4.2 apresenta o fluxo mássico da emissão do CO₂ realizado em cada ensaio. Os demais valores são apresentados em Apêndice.

PONTO	Julho de 2008	Julho de 2009
	Emissão (g CO₂ m⁻² min⁻¹)	Emissão (g CO₂ m⁻² min⁻¹)
1	0,0017	0,0010
2	0,0030	0,0033
3	0,0169	0,0113
4	0,0166	0,0159
5	0,0136	0,0129
6	0,0289	0,0282
7	0,0226	0,0256
9	0,0462	0,0355
10	0,0717	0,0232
12	0,0322	0,0561
13	0,0442	0,0621
14	0,0664	0,0551
15	0,0847	0,0488
16	0,0425	0,0711
18	0,0598	0,0850
19	Não houve ensaio	0,0817
20	Não houve ensaio	0,1382
21	Não houve ensaio	0,0345

Tabela 4-2 Fluxo Mássico da Emissão do CO₂

Obs.: As medidas nos queimadores foram desprezadas

O fluxo de CH_4 emitido pela superfície do aterro em Julho de 2008 variou entre 0,0016 a 0,0332 $\text{g/m}^2 \cdot \text{min}$ e em Julho de 2009 variou entre 0,0002 a 0,0630 $\text{g/m}^2 \cdot \text{min}$. Representando o fluxo em termos volumétricos, houve uma variação em Julho de 2008 de 0,2307 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ ou 84,21 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$ a 4,787 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ ou 1.741,41 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$. Em Julho de 2009 houve uma variação de 0,0288 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ ou 10,53 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$ a 9,0846 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ ou 3.315,88 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$.

Em relação ao fluxo de CO_2 emitida pela superfície do aterro em termos volumétricos variou em Julho de 2008 de 339,54 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ a 16.915,85 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$. Em Julho de 2009 esta variação foi de 199,73 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ a 27.601,30 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$.

4.5 Resultado do valor do Cálculo de k (Constante de Decaimento)

Para o cálculo da Constante de Decaimento para o CH_4 , utilizou-se os maiores valores de emissões encontrados entre Julho de 2008 e Julho de 2009, resultando o valor de $k = 0,05 \text{ (t}^{-1}\text{)}$, valor dentro dos parâmetros da literatura.

4.6 Resultado do valor do Decaimento

Como demonstrado anteriormente, as emissões na superfície do aterro sanitário variaram em função da idade do lixo depositado, sendo encontrados pontos, os quais não foram possíveis calcular sua emissão, e outros pontos com diminuição o/ou aumento da mesma. Novamente foi utilizado o valor médio, resultando um tempo de aproximadamente 14 anos para produção de biogás chegar aos valores de fundo (ar atmosférico).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Como demonstrado no Capítulo 4, às emissões mensuradas de CH₄ em 2008 foram de 1.741,41 m³/m².ano, e em 2009 foram de 3.315,88 m³/m².ano, e as emissões mensuradas de CO₂ em 2008 foram de 16.915,85 m³/m².ano, e em Julho de 2009 foram de 27.601,30 m³/m².ano.

Considerando que o CH₄ possui um potencial efeito estufa 21 vezes maior que o CO₂ num horizonte de 100 anos, a contribuição deste aterro seria de 69.633,48 m³/m².ano, contribuindo no aprisionamento do calor na atmosfera.

A técnica da Placa de Fluxo utilizada nesta pesquisa, mostrou ser eficiente para fornecer dados sobre o comportamento das emissões do biogás, “*in situ*”, bem como um procedimento de baixo custo e fácil manipulação.

Práticas simples de operações em aterros sanitários, como uma melhor compactação do solo, colocação de camadas de cobertura vegetal, instalação de “*flares*” (Queimadores) de maneira que sejam atingidas todas as camadas de lixo, permitiriam uma menor emissão do biogás para a atmosfera.

A utilização do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), citado no Protocolo de Kyoto, que cria parâmetros para a comercialização de créditos de carbono, através dos Certificados de Emissões Reduzidas (CERs) deveria ser utilizada para obtenção de recursos financeiros com aplicação na melhoria da qualidade ambiental, da operacionalização do aterro, bem como a implantação de coletas seletivas, e aproveitamento energético da queima do biogás.

5.2 Sugestões

Estas sugestões são sugeridas para futuras pesquisas com a finalidade do aprimoramento, continuidade deste trabalho:

- Investigar “*in situ*” o comportamento de fluxo e retenção do biogás para diferentes tipos de camadas de cobertura;
- Estudar o efeito das fissuras no solo da cobertura nas emissões de gases por meio de ensaios da placa de fluxo;
- Avaliar o fluxo de gases pelas laterais do aterro, com a finalidade de um melhor entendimento da movimentação dos gases no interior de aterro
- Estudar a influência da compactação da camada de cobertura do aterro, bem como os materiais utilizados, a espessura da camada, a presença de vegetação e o grau de compactação.

REFERÊNCIAS

D'ALMEIDA, M.L.O.; VILHENA, A. (Coord.). (2000). **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. São Paulo: IPT/CEMPRE. (Publicação IPT, 2622).

ALCÂNTARA, P.B. (2007). Avaliação da Influência da Composição de Res[íduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Sanitários Simulados. **Tese de Doutorado**. Grupo de Resíduos Sólidos (GRS), Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

ANDREOTTOLA, G.; COSSU, R. (1988). Model of production of the landfill biogas. **RS-Rifiuti Solidi**, Itália, v.2, n.6, p.473-483.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1985). **NBR 8849**: Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro.

_____. (1989). **NBR 10703**: Degradação do solo - terminologia. Rio de Janeiro.

_____. (1992). **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro.

_____. (1997). **NBR 13896**: Aterros de resíduos sólidos não perigosos – critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro.

_____. (2004a). **NBR 10.004**: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro.

_____. (2004b). **NBR 10.007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro.

AUGENSTEIN, D.; PACEY, J. (1991). Modeling landfill methane generation. In: INTERNATIONAL ON BIOGAS DISPOSAL AND UTILIZATION, CHOISE OF MATERIAL AND QUALITY CONTROL, LANDFILL COMPLETION AND AFTERCARE, ENVIRONMENTAL MONITORING, 3., 1991, Cagliari. **Proceedings...** Cagliari: CISA. p.115-148.

BARLAZ, M.A.; MILKE, M.W.; HAM, R.K. (1987). Gas production parameters in sanitary landfill simulators. **Waste Management and Research**, Amsterdam, v.5, n.1, p.27-39.

BEKER, D. (1987). Control of acid phase degradation, In: PROCESS TECHNOLOGY AND ENVIRONMENT IMPACT OF SANITARY LANDFILL, **Proceedings...** Sardinia: Ghiani.

BIRGEMER, H.G.; CRUTZEN, P.J. (1987). The Production of methane from solid wastes. **Journal of Geophysical Research: atmosphere**, Washington, v.92, n.D2, p.2181 - 2187.

BOUR O.; TAFFOUREAU, E.; THERRIEN, R. (2003). Lateral landfill gas migration: characterization and preliminary modeling results. In: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 9., 2003, Sardinia. **Proceedings...** Sardinia: Ghiani.

BUIVID, M.G. (1980). Laboratory simulation of fuel gas production enhancement from municipal solid waste landfills, In: BUIVID ET ALL (1981). Fuel gas enhancement by controlled landfilling of municipal solid waste. *Research and Conservation*, 6, 3-20.

CAMPOS, J.R. (Coord.). (1999). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES.

CHRISTENSEN, T.H.; KJELDSSEN, P. (1989). Basic biochemical process in landfills. In: CHRISTENSEN, T.H.; COSSU, R.; STEGMANN, R. (Ed.). **Sanitary landfilling: process, technology and environment impact**. London: Academic Press. p.29-49.

CHRISTENSEN, T.H.; COSSU, R.; STEGMANN, R. (1996). **Landfilling of waste: biogas**. London: E & FN Spon.

CHRISTENSEN, T.H.; KJELDSSEN, P.; STEGMANN, R. (1992). Effects of Landfill management procedures on landfill stabilization and leachate and gas quality. In: CHRISTENSEN, T.H.; COSSU, R.; STEGMANN, R. (Ed.). **Landfill of waste: leachate**. London: E & FN Spon. p.119-136.

CHRISTENSEN, K.; PRISUM, M.; SKOV, C. (1985). **Effects of landfill with recirculation leachate**. Lyng: Enviroplan.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (2005). **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares** – relatório de 2004. São Paulo: CETESB.

Disponível em:<www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 10/04/2008

_____. (2009). **Proclima**: programa estadual de mudanças climáticas. Disponível em:<http://homologa.ambiente.sp.gov.br/proclima/efeito_estufa/gases_fontes.asp>. Acesso em: 15/07/2009

COSSU, R. et al. (1997). Biogás emission measurements using static and dynamic flux chambers and infrared methods. In: INTERNATIONAL LANDFILL SYMPOSIUM, 6., 1997, Cagliari. **Proceedings...** Berlin: Springer. v.4, p.103-114.

DÖBERL, G. et al. (2003). The Heterogeneity of waste as a main factor influencing the future emission potential of MSW landfills - a case study on the breitenau-landfill in Austria. In: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 9., 2003, Sardinia. **Proceedings...** Sardinia: Ghiani.

EMCON (1980). **Methane generation and recovery from landfill**. San José: EMCON; Ann Arbor: Ann Arbor Science. p.44-51.

FÉCIL, B.; HÉROUX, M.; GUY, C. (2003). Development of a method for the measurement of net methane emissions from MSW landfills. In: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 9., 2003, Sardinia. **Proceedings...** Sardinia: Ghiani.

FRESCA, F.R.C. (2007). **Estudo da geração de resíduos sólidos municipais no município de São Carlos, SP, a partir da caracterização física**. 133p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

GENBEDIEN, A. et al. (1992). **Landfill gas** – from environment to energy. Luxembourg: Commission of the European Communities, Directorate-General Telecommunications, Information Industries and Innovation.

GHABAEI, K.; RODWELL, W.R. (1989). **Landfill gas modelling** – a literature survey of landfill gas generation and migration. Winfrith: Petroleum Reservoir Technology Division, Winfrith Technology Centre.

GRADEL, T.E.; CRUTZEN, P.J. (1997). **Atmosphere, climate and change**. New York: Scientific American.

HUTCHINSON, G.L.; LIVINGSTON, G.P. (1993). Use of chamber systems to measure trace gas fluxes. In: HARPER, L.A. et al. (Ed.). **Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change**. Madison: ASA; CSSA; SSSA. p.63-78. (ASA Spec. Publ. 55).

IGNATIUS, S.G. (1999). **Fluxo unidirecional de gás através de um solo compactado** – determinação laboratorial dos parâmetros. 337p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL (2008). **Classificação dos resíduos sólidos**. Disponível em:<<http://www.ibam.org.br/>>. Acesso em: 25 set. 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2000). **Pesquisa nacional de saneamento básico**. Rio de Janeiro: IGBE.

INTERGOVERNMENT PANEL ON CLIMATE CHANGE (1996). **IPCC guidelines for National Greenhouse Gases Inventory**. v.3. Disponível em<<http://www.ipcc2nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6>>. Acesso em: 12/08/2008

_____. (2001). **Climate change 2001: a scientific basis**. Cap.6. Disponível em:<http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/>. Acesso em: 12/08/2008

_____. (2003a). **Good practice guidelines**. Disponível
em:<<http://www.ipcc2nggip.iges.or.jp/>>. Acesso em: 12/08/2008

_____. (2003b). **Tools of adicionality**. Disponível
em:<<http://www.ipcc2nggip.iges.or.jp/>>. Acesso em: 12/08/2008

_____. (2006a). **IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. v.5.
Disponível
em:<www.ipcc2nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V_3_Ch3_SWDS.pdf>.
Acesso em: 12/08/2008

_____. (2006b). Disponível em:<www.ipcc-nggip.iges.or.jp/>. Acesso em: 12/08/2008

KIM, S.; TOJO, Y.; MATSURO, T. (2008). Compartment model of aerobic and anaerobic biodegradation in a municipal solid waste landfill. **Waste Management and Research**, Amsterdam, v.25, n.6, p.524-537, Dec.

KINMAN, R.N. et al. (1987). Gas enhancement techiques in landfill simulators. **Waste Management and Research**, Amsterdam, v.5, n.1, p.13-26.

KYOTO protocol to the united nations framework convention on climate change. (1998). Kyoto: FCCC/CP. Report of the conference the parties on its third session, held at Kyoto from 1 to 11 december 1997, FCCC/CP/1997/7/add.1 18 march 1998.

LANG, R.J. et al. (1989). **Movement of gases in municipal solid waste landfills**. (Report prepared for the California Waste Management Board).

BRASIL, Lei Estadual nº12.300, de 16 de Março de 2006. Insitui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e define princípios e diretrizes. **Diário Oficial do Estado**, de 17 de março de 2006, Caderno Executivo

LECKIE, J.O.; PACEY, J.G. (1986). Landfill management with moisture control. **Journal of Environmental Engineering Division**, New York, v.105, n.EE2, p.337-355, Apr.

LEUSCHENE, A.P.; MELDEN JR., H.A. (1983). **Landfill enhancement for improving methane production and leachate quality**. Apresentado ao 56th Annual Conference of the waste Pollution Control Federation, Atlanta, 1983.

LUNING, L.; TRENT, J. (1993). Gaseous emission of landfill sites. In: INTERNATIONAL LANDFILL SYMPOSIUM, 4., 1993, Cagliari. **Proceedings...** Cagliari: CISA. p.657-668.

MACIEL, F.J. (2003). **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. 159f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MARIANO, M.O.H. (2008). **Avaliação da retenção de gases em camadas de coberturas de resíduos sólidos**. 225f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

MENDONÇA, R.M.G. (2007). **Estudo da difusão de oxigênio em materiais de cobertura**. 354f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Douglas Comparotto Minamisako – Chefe da Divisão de Gestão de Resíduos Sólidos

MINAMISAKO, D.C. (2009) – Prefeitura Municipal

MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECOLOGIA (2008). Relatório: “status atual das atividades de projeto no âmbito do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) no Brasil e no mundo - Junho de 2008”. Disponível em:<www.mct.gov.br/clima>. Acesso em: 09/02/2009.

MORIN, K.A. et al. (1991). **Critical literature review of acid drainage from waste rock**. Ottawa: Department of Indian and Northern Affairs Canada. (MEND Report 1.11.1).

SEELY, G.E.; HUNT, J. (1994). Buoyant advection of gases in unsaturated soil. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v.120, n.5, p.1230-1247, Sept.

SENIOR, E.; BALBA, M.T.M. (1990). Refuse decomposition. In: SENIOR, E. (Ed.). **Microbiology of landfill sites**. Boca Raton: CRC Press. p.17-57.

SIKAR,E.; MATVIENKO, B.; SCHALCH, V. **Aterro sanitário desativado aumenta emissão média de metano de 159 para 2.958 kg d⁻¹**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2006.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. (1993). **Integrated solid waste management**: engineering principles and management issues. Boston: Irwin MacGraw-Hill.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1996). **Turning a liability into an asset**: a landfill gas to energy project development handbook. Cincinnati. (Sep. ref..EPA 430-B-96-0004.).

_____. (2006). **United nations framework convention on climate change**. Disponível em:<<http://cdm.unfccc.int/>>. Acesso em: 2 Feb. 2006.

WILLIAMS, G.M.; AITKENHEAD, N. (1991). Lessons from Loscoe: the uncontrolled migration of landfill gas. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, London, v.24, n.2, p.191-207, May.

WILLUMSEN, H. (2003). Landfill gas plants: number and types worldwide. In: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 9. 2003, Sardinha. **Proceedings...** Cagliari: CISA.

YESILLER, N.; HANSON, J.L. (2003). Analysis of temperatures at a municipal solid waste landfill. In: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 9., 2003, Sardinia. **Proceedings...** Sardinia: Ghiani.

YILDIZ, E.D.; UNLU, K. (2003). Effects of landfill development on leachate characteristics. In: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 9., 2003, Sardinia. **Proceedings...** Sardinia: Ghiani.

ZANIN, M.; MANCINI, S.D. (2004). **Resíduos plásticos e reciclagem**: aspectos gerais e tecnológicos. São Carlos: EdUFSCar.

ZEHNDER, A.J.B.; INGVORSEN, K.; MARTI, T. (1982). Microbiology of methane bacteria, in anaerobic digestion. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF ANAEROBIC DIGESTION, 2., 1981, Travemünde. **Proceedings...** Amsterdam: Elsevier Biomedical. p.45-68.

ZISON, S. (1990). **Landfill gas production curves: myths vs. reality.** City of commerce: Pacific Eneregy.

APÊNDICE

APÊNDICE A

ENSAIOS DA PLACA DE FLUXO

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

PONTO 1 – Julho/2008			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	0,4	0,0	44
5	0,0	0,5	47
10	0,0	0,0	47
15	0,0	0,0	47
20	0,3	0,6	47
25	0,0	0,0	46
30	0,0	0,4	46
35	0,0	0,0	46
40	0,2	0,0	47
45	0,0	0,0	48
50	0,4	0,0	48
55	0,0	0,0	47
60	0,0	0,0	47

PONTO 1 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	0,2	0,0	43
5	0,0	0,3	43
10	0,0	0,0	43
15	0,0	0,0	43
20	0,0	0,0	44
25	0,1	0,0	45
30	0,0	0,3	46
35	0,0	0,0	46
40	0,0	0,0	47
45	0,0	0,0	46
50	0,0	0,0	45
55	0,0	0,0	46
60	0,0	0,0	46

PONTO 2 – Julho/2008			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	1,4	0,8	42
5	0,6	0,7	42
10	0,5	0,6	42
15	0,5	0,6	43
20	0,4	0,4	43
25	0,6	1,0	43
30	0,4	0,6	43
35	0,4	0,5	44
40	0,3	0,5	44
45	0,5	0,8	44
50	0,7	1,0	45
55	0,7	1,2	45
60	0,6	1,0	44

PONTO 2 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	0,6	0,8	42
5	0,8	1,0	44
10	1,0	1,6	44
15	0,6	1,0	44
20	1,0	1,7	44
25	0,8	1,0	45
30	1,2	1,6	47
35	1,0	1,6	47
40	1,0	1,4	47
45	0,8	1,3	47
50	0,8	1,4	46
55	1,0	1,7	46
60	1,0	1,9	46

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

PONTO 3 – Julho/2008			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	1,0	2,5	43
5	1,3	3,1	43
10	1,8	3,3	43
15	2,1	3,5	43
20	2,4	4,2	43
25	2,7	4,8	44
30	3,1	5,7	44
35	3,0	5,8	44
40	2,8	5,9	45
45	2,7	6,3	45
50	2,7	6,8	45
55	2,9	7,4	45
60	2,8	7,9	44

PONTO 3 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	0,3	1,3	45
5	0,3	1,5	45
10	0,4	1,9	45
15	0,6	2,1	45
20	0,3	2,5	45
25	0,3	2,7	45
30	0,5	2,8	46
35	0,5	3,0	46
40	0,6	3,3	46
45	0,6	3,7	46
50	0,6	3,9	46
55	0,7	4,1	46
60	0,7	4,9	45

PONTO 4 – Julho/2008			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	0,5	0,4	42
5	0,6	0,6	42
10	0,6	1,0	42
15	0,8	1,6	42
20	1,0	1,9	42
25	1,7	2,4	42
30	2,2	2,7	42
35	2,5	2,8	42
40	2,7	2,9	44
45	2,9	3,4	44
50	3,3	3,7	44
55	3,8	4,1	44
60	4,2	5,2	44

PONTO 4 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	1,2	2,4	45
5	1,7	2,4	45
10	2,4	3,3	45
15	2,9	3,6	45
20	3,2	4,2	45
25	3,8	4,6	45
30	4,5	5,2	45
35	4,7	5,3	46
40	4,9	5,7	46
45	5,3	6,2	44
50	5,8	6,5	44
55	5,9	7,4	45
60	6,1	7,9	45

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

PONTO 5 – Julho/2008			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	1,9	2,4	43
5	1,9	2,5	43
10	2,6	2,9	43
15	3,5	3,4	43
20	3,9	4,2	43
25	4,6	5,3	43
30	5,4	6,4	43
35	5,6	6,9	44
40	5,8	7,2	44
45	6,3	8,1	46
50	6,8	8,6	46
55	7,5	9,2	46
60	7,9	9,7	45

PONTO 5 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	0,4	0,6	42
5	0,4	0,9	42
10	0,7	1,3	42
15	0,9	1,5	42
20	0,9	2,3	42
25	0,9	2,8	42
30	1,3	3,0	42
35	1,2	3,0	44
40	1,2	3,0	44
45	1,6	3,9	45
50	1,9	4,5	45
55	2,3	5,2	45
60	2,3	5,9	44

PONTO 6 – Julho/2008			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	1,8	2,4	43
5	2,3	3,1	43
10	3,2	3,9	43
15	4,1	4,4	43
20	4,9	4,8	43
25	5,2	6,3	43
30	5,7	6,9	43
35	6,1	7,1	44
40	6,3	7,4	44
45	7,2	7,9	44
50	8,3	8,5	45
55	8,8	8,9	45
60	9,2	9,2	45

PONTO 6 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	2,3	3,1	42
5	3,0	3,6	42
10	3,7	4,2	42
15	4,9	5,1	42
20	5,5	6,1	42
25	6,4	7,2	43
30	7,3	8,0	43
35	7,4	8,2	43
40	7,9	8,8	43
45	8,4	9,3	43
50	9,2	9,5	45
55	10,5	10,6	45
60	10,6	11,0	45

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

PONTO 7 – Julho/2008			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	3,1	3,3	42
5	3,9	3,7	42
10	4,8	4,1	42
15	5,2	4,9	42
20	7,3	6,3	42
25	8,2	7,2	42
30	8,9	7,9	45
35	9,1	8	45
40	9,4	8,3	45
45	10,3	9,2	44
50	10,8	9,9	45
55	11,7	10,2	44
60	11,9	10,8	44

PONTO 7 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	4,2	3,3	45
5	4,5	3,8	45
10	5,3	4,3	45
15	5,9	5,1	45
20	6,4	5,7	45
25	6,9	6,1	45
30	7,5	6,3	44
35	7,9	7,0	44
40	8,1	7,2	44
45	9,6	7,5	45
50	10,3	8,1	47
55	10,9	8,8	45
60	11,1	9,8	46

PONTO 8 – Julho/2008			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	33,0	12,0	38
5	32,0	14,0	39
10	33,0	14,0	38
15			
20			
25			
30			
35			
40			
45			
50			
55			
60			

PONTO 8 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	35,0	18,0	38
5	35,0	18,0	38
10	36,0	19,0	38
15			
20			
25			
30			
35			
40			
45			
50			
55			
60			

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

PONTO 9 – Julho/2008			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	5,9	3,8	46
5	6,4	4,3	46
10	7,1	5,3	46
15	7,9	6,8	46
20	8,4	7,2	46
25	9,7	8,3	48
30	10,2	9,8	48
35	10,9	9,9	48
40	11,5	10,2	48
45	11,9	10,8	48
50	12,6	11,2	47
55	12,9	11,8	48
60	13,1	12,1	48

PONTO 9 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	6,5	7,2	47
5	7,2	8,3	47
10	9,4	9,1	47
15	10,3	9,4	47
20	11,5	10,5	47
25	12,7	11,2	48
30	13,9	11,8	48
35	14,1	12,3	48
40	14,3	12,9	48
45	15,4	13,5	48
50	16,4	14,6	48
55	17,3	15,0	49
60	18,2	16,9	49

PONTO 10 – Julho/2008			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	7,1	5,6	47
5	9,2	8,4	47
10	10,3	9,2	47
15	11,4	10,3	47
20	12,6	11,4	47
25	13,9	12,1	47
30	14,1	12,7	47
35	14,4	12,7	47
40	14,7	12,9	46
45	15,4	13,7	46
50	15,9	14,2	47
55	16,3	14,9	46
60	17,2	15,2	47

PONTO 10 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	9,3	7,1	48
5	9,8	7,3	48
10	10,2	8,2	49
15	10,9	8,8	49
20	12,1	9,4	49
25	12,7	10,1	48
30	13,5	10,8	48
35	13,9	10,9	48
40	14,2	11,5	48
45	15,6	12,7	47
50	16,4	12,9	47
55	17,9	13,6	47
60	19,2	14,9	48

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

PONTO 11 – Julho/2008			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	36,0	22,3	38
5	37,0	23,4	38
10	38,0	24,0	38
15			
20			
25			
30			
35			
40			
45			
50			
55			
60			

PONTO 11 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	38,0	23,1	40
5	38,0	23,0	40
10	39,0	23,8	40
15			
20			
25			
30			
35			
40			
45			
50			
55			
60			

PONTO 12 – Julho/2008			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	4,8	3,9	44
5	5,6	4,8	44
10	6,3	5,3	44
15	7,2	6,1	45
20	8,4	6,9	45
25	9,3	7,2	45
30	10,8	8,3	46
35	11,1	8,7	46
40	11,7	9,4	46
45	12,6	10,6	46
50	13,7	11,8	45
55	14,9	12,9	45
60	15,8	13,1	45

PONTO 12 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	6,2	5,2	46
5	7,3	6,1	46
10	9,5	7,9	46
15	10,7	9,2	46
20	12,9	10,3	46
25	14,1	11,0	45
30	15,9	12,8	45
35	16,2	13,4	45
40	17,3	14,2	45
45	18,9	16,1	45
50	22,0	19,4	46
55	23,8	21,1	46
60	24,3	22,3	46

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

PONTO 13 – Julho/2008			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	7,2	5,2	42
5	8,3	6,9	42
10	9,6	7,2	42
15	10,3	8,1	42
20	11,4	9,3	41
25	11,9	10,2	41
30	13,7	11,1	41
35	14,2	12,0	42
40	14,2	12,4	42
45	15,9	13,1	42
50	16,4	13,9	43
55	17,9	14,7	43
60	18,3	15,1	44

PONTO 13 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	8,1	6,2	46
5	9,2	7,3	46
10	11,0	9,2	46
15	12,9	10,6	45
20	14,5	11,2	45
25	17,3	12,1	45
30	18,9	13,8	44
35	19,3	14,2	44
40	21,4	14,2	44
45	22,5	15,8	45
50	24,7	16,3	45
55	25,9	16,9	45
60	26,7	17,2	45

PONTO 14 – Julho/2008			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	7,5	6,1	42
5	9,2	7,2	42
10	11,3	8,4	42
15	12,4	9,7	43
20	14,9	10,8	43
25	16,2	11,3	44
30	17,8	12,7	44
35	18,3	13,2	44
40	19,2	13,8	44
45	22,1	14,3	45
50	22,9	15,0	45
55	23,4	18,3	45
60	23,5	19,2	45

PONTO 14 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	8,4	6,2	45
5	10,2	7,2	45
10	11,4	9,4	45
15	12,9	10,1	46
20	14,3	11,4	46
25	16,4	12,6	46
30	17,9	14,2	47
35	18,1	14,4	47
40	19,6	15,3	47
45	21,7	17,1	48
50	23,9	18,3	48
55	25,3	19,5	48
60	26,0	21,8	47

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

PONTO 15 – Julho/2008			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	8,1	5,6	42
5	10,2	8,7	42
10	12,8	9,3	42
15	13,9	11,2	41
20	14,6	13,0	41
25	16,1	13,8	41
30	16,8	14,7	41
35	17,0	15,1	41
40	19,5	15,5	40
45	22,3	18,3	41
50	23,7	17,2	42
55	24,9	16,8	42
60	25,6	16,3	42

PONTO 15 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	9,2	8,0	47
5	11,4	8,7	47
10	13,7	10,0	47
15	14,8	11,4	47
20	15,4	12,2	46
25	17,2	13,5	46
30	18,6	15,0	46
35	19,3	16,4	47
40	20,2	18,4	47
45	23,6	19,0	47
50	24,8	20,1	48
55	25,9	20,2	48
60	27,0	21,3	48

PONTO 16 – Julho/2008			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	7,2	6,3	42
5	10,5	7,1	42
10	12,4	8,2	42
15	12,8	9,3	43
20	13,9	10,7	44
25	14,6	11,5	44
30	17,4	12,8	44
35	18,7	13,1	44
40	19,9	13,3	44
45	20,3	14,8	45
50	22,7	15,4	45
55	25,6	16,7	45
60	27,4	17,4	45

PONTO 16 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	8,8	5,4	47
5	10,2	6,8	47
10	13,4	8,3	48
15	14,9	10,4	48
20	16,3	12,9	48
25	18,5	13,2	48
30	19,3	15,7	47
35	21,4	16	47
40	22,3	16,9	47
45	25,7	17,1	47
50	27,4	17,8	47
55	29,6	18,7	48
60	30,2	19,4	48

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

PONTO 17 – Julho/2008			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	48,0	26,0	39
5	49,0	25,8	39
10	49,0	26,0	39
15			
20			
25			
30			
35			
40			
45			
50			
55			
60			

PONTO 17 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	49,0	26,7	38
5	49,0	25,0	39
10	51,0	25,8	39
15			
20			
25			
30			
35			
40			
45			
50			
55			
60			

PONTO 18 – Julho/2008			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	8,1	4,6	47
5	9,2	5,8	47
10	11,3	8,0	49
15	14,7	8,8	49
20	16,5	11,2	50
25	19,4	12,2	50
30	22,1	13,5	51
35	22,8	13,8	51
40	25,4	15,0	51
45	29,7	15,1	51
50	32,8	17,9	50
55	34,6	20,0	50
60	35,3	20,2	50

PONTO 18 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	9,3	7,6	48
5	11,2	10,0	49
10	14,9	11,3	50
15	17,3	13,4	50
20	20,7	15,8	50
25	22,6	17,1	49
30	23,5	19,4	50
35	24,4	19,8	51
40	26,9	21,0	51
45	33,6	23,4	50
50	34,7	24,6	50
55	35,6	25,1	50
60	37,7	25,9	51

QUANTIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO – ESTUDO DE CASO DO
ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS

PONTO 19 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	11,6	10,0	50
5	15,4	13,0	50
10	19,3	14,6	51
15	23,7	15,4	51
20	26,2	17,8	51
25	29,6	19,3	51
30	31,1	22,6	50
35	32,2	23,1	50
40	35,3	24,5	50
45	38,5	26,7	49
50	49,4	31,1	49
55	51,1	32,4	50
60	54,0	33,8	50

PONTO 20 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	7,3	2,1	50
5	10,2	6,5	50
10	14,6	9,2	51
15	19,5	10,4	51
20	22,8	13,3	51
25	26,7	15,7	51
30	32,8	16,2	50
35	35,6	16,8	50
40	39,4	17,9	50
45	41,8	22,1	50
50	43,7	23,2	49
55	48,9	24,0	50
60	52,6	26,4	50

PONTO 21 – Julho/2009			
t (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	T °C (int)
0(1 min)	8,6	2,7	50
5	10,5	3,1	50
10	13,8	4,4	50
15	15,4	4,8	50
20	17,6	5,6	51
25	19,3	7,2	51
30	22,7	8,4	51
35	23,6	9,1	51
40	24,6	9,9	51
45	28,1	10,5	52
50	30,5	11,7	52
55	33,9	12,8	51
60	39,6	13,4	51