

Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro Tecnológico  
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

Vanessa Cristina Ferreira Dias

**Estudo das emissões de biogás nos aterros sanitários de Içara e Tijuquinhas**

Florianópolis

2009

Vanessa Cristina Ferreira Dias

**Estudo das emissões de biogás nos aterros sanitários de Içara e Tijuquinhas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Armando Borges de Castilhos Jr, Dr.

Florianópolis, 2009

Dias, Vanessa Cristina Ferreira Dias

Estudo das emissões de biogás nos aterros sanitários de Içara e Tijuquinhas / Vanessa Cristina Ferreira Dias. Florianópolis: UFSC / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2009.

xvi, 115 f.: il.

Orientador: Armando Borges de Castilhos Jr

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2009.

1. Resíduos Sólidos. 2. Aterro sanitário. 3. Emissões de gases. 4. Biogás – dissertação. I. Castilhos Jr, Armando Borges. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho:  
Aos meus queridos pais,  
Adilson (in memoriam) e Conceição,  
aos meus irmãos Viviam e Vinícius  
e ao meu namorado Leandro que se demonstrou  
presente em todos os momentos .*

## **AGRADECIMENTOS**

O desenvolvimento dessa pesquisa só foi possível graças ao apoio de algumas pessoas e instituições, às quais eu gostaria de agradecer:

À toda a minha família, em especial à minha mãe, Conceição, pelo exemplo de luta, carinho e incentivo em toda a minha formação;

Ao meu namorado, Leandro, pelo companheirismo, amor, compreensão e gentileza em revisar meu trabalho;

Ao professor Armando Borges de Castilhos Junior pela orientação, sugestões e oportunidade de executar essa pesquisa;

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA), que proporcionaram auxílio e infra-estrutura no decorrer desta pesquisa;

Aos professores Paulo Belli Filho, Henry Xavier Corseuil e Alexandre Cabral por aceitarem compor minha banca e contribuir com meu trabalho;

Aos pesquisadores e amigos do Laboratório de Pesquisa em Resíduos Sólidos (LARESO), em especial Débora, Bianca, Elivete, Paulo e Fábio;

Aos meus queridos amigos, Andreas, Anigeli, Carla, Fernanda, Heloísa, Iracema, Lucila, Paola, Rodrigo Alvarenga, Rodrigo Mohedano e Vamilson, por todos os momentos compartilhados;

Ao CNPq, FACEPE e FAPESC pelo apoio financeiro nestes dois anos de pesquisa;

À Santec Resíduos e Proactiva Meio Ambiente Brasil, que aceitaram a execução desta pesquisa em seus aterros sanitários;

Ao professor José Fernando Thomé Jucá e ao Grupo de Resíduos Sólidos (GRS) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), pelo auxílio em minha pesquisa;

Ao Edevaldo do Laboratório de Ciências Térmicas (LabTermo), pela confecção do bocal e da placa de fluxo;

Ao professor Marciano Maccarini e aos bolsistas César e Karina do Laboratório de Mecânica dos Solos, pelo auxílio na realização dos ensaios com os solos dos aterros;

À Vera Lúcia, da Epagri/Inmet, pela gentileza no fornecimento dos dados meteorológicos;

À todos que, de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigada.

Vanessa Cristina Ferreira Dias

## RESUMO

O aumento da produção de resíduos sólidos urbanos não é compatível com os investimentos públicos nesse setor. Um dos principais problemas relacionados aos resíduos é a falta de destinação adequada em muitos municípios brasileiros, gerando diversos agravantes ambientais, sanitários e sociais. Os resíduos sólidos quando tratados por processo anaeróbio, como ocorrido em aterros sanitários, têm como um de seus produtos o biogás. Este, devido a sua elevada concentração em metano (45-60%) é atualmente apontado como um dos principais responsáveis pelo efeito estufa de origem antropogênica. Porém, devido à presença do metano, o biogás apresenta elevado poder calorífico, podendo ser aproveitado energeticamente. Para isso, faz-se necessário o estudo das emissões deste gás para verificar a viabilidade econômica de seu aproveitamento. Assim, esta pesquisa teve como objetivo principal o estudo das emissões de biogás em aterros de resíduos sólidos urbanos. A metodologia consistiu na análise das emissões de biogás proveniente da degradação dos resíduos sólidos nos poços de captação e na camada de cobertura, sendo aplicada nos aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos de Içara e de Tijuquinhas, ambos localizados no Estado de Santa Catarina. Também foi utilizado um modelo para a estimativa teórica da curva de geração de metano nos aterros fazendo a sua comparação com o valor obtido em campo referente ao mesmo ano. Através dos ensaios realizados foi possível estimar para o aterro de Içara uma taxa de geração atual de biogás entre 24,7 Nm<sup>3</sup>/t.ano e 29,8 Nm<sup>3</sup>/t.ano com concentração média de 46,9% de CH<sub>4</sub>. O fluxo total de CH<sub>4</sub> obtido pela camada de cobertura correspondeu a 9,5% das emissões totais provindas da degradação dos resíduos dipostos no aterro para o ano de 2008. Já para o aterro de Tijuquinhas, a taxa de geração de biogás esteve na faixa entre 16,72 Nm<sup>3</sup>/t.ano e 20,46 Nm<sup>3</sup>/t.ano, para os poços de extração ativa, com concentração média de 53,8% de CH<sub>4</sub>. O fluxo total de CH<sub>4</sub> obtido pela camada de cobertura correspondeu a 6,8% das emissões totais no aterro para o ano de 2008. Para este último aterro encontrou-se através de correlação uma influência negativa moderada da densidade do solo em campo com o fluxo de CH<sub>4</sub>.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos. Aterro sanitário. Emissões de gases. Biogás.

## ABSTRACT

Public investments in the disposal of urban solid waste are not compatible with its increasing production. One of the main problems in this area, is the lack of an adequate disposal for the residuals in many of the Brazilian cities, generating various kinds of environmental, sanitary and social difficulties. The solid wastes when treated by anaerobic pathways, as it occurs in landfills, generate biogas as a product. This gas, due to its high methane concentration (45-60%) is pointed nowadays as one of the principal responsables for the anthropogenic greenhouse effect. However, also due to methane presence, the biogas has a high calorific power allowing its energetic use. For this, the study of the methane emissions is needed to guarantee the economical viability of its exploration. Thus, this research focused the study of biogas emissions in urban solid waste landfills. The methodology consisted on the analysis of biogas emissions produced by the degradation of the solid waste measured at the wells and at the cover layer, being applied at the landfills of Içara and Tijuquinhas, both located in the State of Santa Catarina, Brazil. It has been also tested a model to theoretically estimate methane generation from the landfills making the comparison between the estimated values and the values obtained in the field for the same year. It was possible to estimate for the landfill of Içara an actual biogas generation tax between 24,7 Nm<sup>3</sup>/t.year and 29,8 Nm<sup>3</sup>/t.year with a mean concentration of 46,9% of CH<sub>4</sub>. The total CH<sub>4</sub> flux obtained from the cover layer corresponded to 9,5% of the total emissions came from the degradation of the residuals placed at the landfill in the year of 2008. In what refers to the Tijuquinhas landfill, the biogas generation tax was between 16,72 Nm<sup>3</sup>/t.year and 20,46 Nm<sup>3</sup>/t.year, for the wells of active extraction, with a mean concentration of 53,8% de CH<sub>4</sub>. The total CH<sub>4</sub> flux obtained from the cover layer corresponded to 6,8% of the total emissions from the landfill for 2008. For this Tijuquinhas landfill, a moderate negative influence from the soil density in the field into the flux of methane.

Keywords: Solid Wastes. Landfill. Gas Emissions. Landfill gas.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Destinação final dos RSU coletados. ....	28
Figura 2. Colocação da manta PEAD.....	31
Figura 3. Sistema de drenagem de gases. ....	33
Figura 4. Drenagem de águas pluviais.....	33
Figura 5. Fases da produção do biogás.....	36
Figura 6. Fatores que afetam a produção do biogás. ....	41
Figura 7. Esquema de placa de fluxo dinâmica. ....	50
Figura 8. Esquema da placa de fluxo estática.....	51
Figura 9. Localização do aterro sanitário de Içara.....	58
Figura 10. Dreno de biogás.....	59
Figura 11. Esquema do aterro com a disposição dos drenos.....	60
Figura 12. Localização do aterro sanitário de Tijuquinhas. ....	60
Figura 13. Esquema do aterro de Tijuquinhas dividido em zonas. ....	62
Figura 14. Drenos extração ativa Tijuquinhas.....	63
Figura 15. Termo-anemômetro digital. ....	64
Figura 16. Bocal instalado no dreno.....	65
Figura 17. Medidor de concentração de gases.....	65
Figura 18. Esquema da placa de fluxo.....	68
Figura 19. Seqüência para cravamento da placa de fluxo e o tubo de PVC.....	69
Figura 20. Leituras na placa de fluxo. ....	70
Figura 21. Ensaios de placa de fluxo no aterro de Içara.....	70
Figura 22. Ensaios de placa de fluxo no aterro de Tijuquinhas.....	70
Figura 23. Vazões médias de biogás e intervalos de confiança 99%. ....	75
Figura 24. Vazões médias de metano e intervalos de confiança 99%. ....	76
Figura 25. Variações nas concentrações de CH <sub>4</sub> . ....	77
Figura 26. Variações nas concentrações de CO <sub>2</sub> . ....	78
Figura 27. Variações nas concentrações de O <sub>2</sub> . ....	79
Figura 28. Variações nas concentrações de H <sub>2</sub> S.....	79
Figura 29. Curvas de geração de metano para os cenários propostos. ....	81
Figura 30. Curva granulométrica do solo (camada de cobertura) do aterro de Içara. ....	82
Figura 31. Curva de compactação do solo (camada de cobertura) do aterro de Içara.....	82
Figura 32. Ensaio E1 - variação das concentrações no tempo.....	83
Figura 33. Ensaio E2 - variação das concentrações no tempo.....	83

Figura 34. Ensaio E3 - variação das concentrações no tempo.....	83
Figura 35. Ensaio E4 - variação das concentrações no tempo.....	83
Figura 36. Ensaio E5 - variação das concentrações no tempo.....	83
Figura 37. Ensaio E6 - variação das concentrações no tempo.....	83
Figura 38. Ensaio E7 - variação das concentrações no tempo.....	84
Figura 39. Ensaio E8 - variação das concentrações no tempo.....	84
Figura 40. Ensaio E9 - variação das concentrações no tempo.....	84
Figura 41. Ensaio E10 - variação das concentrações no tempo.....	84
Figura 42. Locais dos ensaios e pontos de maior variação em destaque.....	84
Figura 43. Variação da massa de CH <sub>4</sub> no tempo de ensaio (<0,2 g). .....	85
Figura 44. Variação da massa de CH <sub>4</sub> no tempo de ensaio (>0,2 g). .....	85
Figura 45. Variação da massa de CO <sub>2</sub> no tempo de ensaio (<0,7 g). .....	86
Figura 46. Variação da massa de CO <sub>2</sub> no tempo de ensaio (>0,7 g). .....	86
Figura 47. Relação C/C <sub>0</sub> do CH <sub>4</sub> durante os ensaios.....	87
Figura 48. Relação C/C <sub>0</sub> do CO <sub>2</sub> durante os ensaios.....	87
Figura 49. Vazões médias de biogás e intervalos de confiança 99%. .....	91
Figura 50. Vazões médias de metano e intervalos de confiança 99%. .....	92
Figura 51. Variações nas concentrações de CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> E O <sub>2</sub> .....	93
Figura 52. Variações nas concentrações H <sub>2</sub> S. ....	94
Figura 53. Curvas de geração de metano para em L1. ....	96
Figura 54. Curvas de geração de metano, incluindo o cenário 6.....	96
Figura 55. Curva granulométrica do solo (camada de cobertura) do aterro de Içara. ....	97
Figura 56. Curva de compactação do solo (camada de cobertura) do aterro de Içara.....	98
Figura 57. Ensaio E1 - variação das concentrações no tempo.....	98
Figura 58. Ensaio E2 - variação das concentrações no tempo.....	98
Figura 59. Ensaio E3 - variação das concentrações no tempo.....	99
Figura 60. Ensaio E4 - variação das concentrações no tempo.....	99
Figura 61. Ensaio E5 - variação das concentrações no tempo.....	99
Figura 62. Ensaio E6 - variação das concentrações no tempo.....	99
Figura 63. Ensaio E7 - variação das concentrações no tempo.....	99
Figura 64. Ensaio E8 - variação das concentrações no tempo.....	99
Figura 65. Ensaio E9 - variação das concentrações no tempo.....	100
Figura 66. Ensaio E10 - variação das concentrações no tempo.....	100
Figura 67. Ensaio E11 - variação das concentrações no tempo.....	100
Figura 68. Ensaio E12 - variação das concentrações no tempo.....	100

Figura 69. Ensaio E13 - variação das concentrações no tempo.....	100
Figura 70. Ensaio E14 - variação das concentrações no tempo.....	100
Figura 71. Ensaio E15 - variação das concentrações no tempo.....	101
Figura 72. Locais dos ensaios e pontos de maior variação em destaque.....	101
Figura 73. Variação da massa de CH <sub>4</sub> no tempo de ensaio (<0,2 g). .....	102
Figura 74. Variação da massa de CH <sub>4</sub> no tempo de ensaio (>0,2 g). .....	102
Figura 75. Variação da massa de CO <sub>2</sub> no tempo de ensaio (<0,7 g). .....	103
Figura 76. Variação da massa de CO <sub>2</sub> no tempo de ensaio (>0,7 g). .....	103
Figura 77. Relação C/C <sub>0</sub> do CH <sub>4</sub> durante os ensaios.....	104
Figura 78. Relação C/C <sub>0</sub> do CO <sub>2</sub> durante os ensaios.....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Velocidade de degradação dos constituintes dos resíduos orgânicos.....	24
Tabela 2. Composição gravimétrica (%) dos RSU de algumas cidades brasileiras. ....	26
Tabela 3. Principais constituintes do biogás.....	38
Tabela 4. Variação das concentrações em uma célula concluída. ....	39
Tabela 5. Compostos orgânicos voláteis do biogás. ....	39
Tabela 6. Taxa de produção de gás em aterros sanitários. ....	40
Tabela 7. Valores sugeridos para $L_0$ . ....	44
Tabela 8. Valores de $k$ ( $\text{ano}^{-1}$ ), em função da precipitação. ....	44
Tabela 9. Valores de FCM sugeridos por IPCC (1996). ....	48
Tabela 10. Valores de $COD$ em função do tipo de resíduo. ....	48
Tabela 11. Comparação entre o biogás e outros combustíveis.....	53
Tabela 12. Comparação entre o biogás e outros gases. ....	54
Tabela 13. Distribuição das atividades de projeto no Brasil por tipo de projeto.....	56
Tabela 14. Fluxo de resíduos no aterro de Içara.....	59
Tabela 15. Fluxo de resíduos no aterro de Tijuquinhas.....	61
Tabela 16. Cenários e valores adotados para a estimativa teórica.....	66
Tabela 17. Intervalos de coleta de dados e parâmetros analisados.....	69
Tabela 18. Parâmetros de caracterização da camada de cobertura.....	71
Tabela 19. Vazão Biogás ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ ).....	74
Tabela 20. Vazão Metano ( $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{h}$ ).....	74
Tabela 21. Concentração média dos gases. ....	77
Tabela 22. Matriz de correlação entre as variáveis. ....	80
Tabela 23. Resultados dos ensaios. ....	88
Tabela 24. Matriz de correlação entre os fluxos e as variáveis do solo e climáticas. ....	89
Tabela 25. Vazão Biogás ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ ).....	90
Tabela 26. Vazão Metano ( $\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{h}$ ).....	90
Tabela 27. Concentração média dos gases. ....	93
Tabela 28. Matriz de correlação entre as variáveis. ....	94
Tabela 29. Resultados dos ensaios. ....	105
Tabela 30. Matriz de correlação entre os fluxos e as variáveis do solo e climáticas. ....	106

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CERs	Certificados de Emissões Reduzidas
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
COD	Carbono Orgânico Degradável
COD <sub>F</sub>	Fração do carbono orgânico degradável assimilado
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
CQNUMC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
EPA	Environmental Protection Agency
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
ESMAP	Energy Sector Management Assistance Program
FACEPE	Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco
FAPESC	Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica do Estado de Santa Catarina
FATMA	Fundação do Meio Ambiente
FCM	Fator de Correção de Metano
FGV	Fundação Getúlio Vargas
GEE	Gases de Efeito Estufa
GRS	Grupo de Resíduos Sólidos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
LARESO	Laboratório de Pesquisa em Resíduos Sólidos
L1	Linha 1
L2	Linha 2
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia

MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
NBR	Norma Brasileira
PCI	Poder Calorífico Inferior
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PPGEA	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
PVC	Policloreto de Vinila
RCEs	Reduções Certificadas de Emissões
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SC	Santa Catarina
SDM	Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TIG	Tungsten Inert Gas
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USEPA	United States Environment Protection Agency

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA .....	17
1.2 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TRABALHO .....	18
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	19
<b>1.3.1 Objetivo geral.....</b>	<b>19</b>
<b>1.3.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>19</b>
1.4 METODOLOGIA.....	20
1.5 LIMITAÇÕES .....	20
1.6 ESTRUTURA.....	21
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>22</b>
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS.....	22
<b>2.1.1 Classificação dos resíduos.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.2 Composição dos RSU .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.3 Taxa de geração dos RSU .....</b>	<b>26</b>
<b>2.1.4 Destinação final dos RSU.....</b>	<b>27</b>
2.2 ATERROS SANITÁRIOS .....	30
2.3 BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS .....	34
<b>2.3.1 Degradação dos RSU e formação do biogás.....</b>	<b>34</b>
<b>2.3.2 Composição do biogás .....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.3 Taxa de geração do biogás.....</b>	<b>40</b>
<b>2.3.4 Fatores interferentes na geração do biogás.....</b>	<b>41</b>
<b>2.3.5 Estimativas teóricas de geração de biogás.....</b>	<b>43</b>
2.3.5.1 Decaimento de primeira ordem – USEPA (1991).....	45
2.3.5.2 <i>School Canyon</i> .....	45
2.3.5.3 IPCC .....	46
<b>2.3.6 Fluxo de biogás pela camada de cobertura .....</b>	<b>49</b>
<b>2.3.7 Potencial energético.....</b>	<b>52</b>
2.4 MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO .....	54
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>57</b>
3.1 LOCAIS DE ESTUDO.....	57
<b>3.1.1 Aterro sanitário de Içara .....</b>	<b>58</b>
<b>3.1.2 Aterro sanitário de Tijuquinhas.....</b>	<b>60</b>
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS GERADO NOS DRENOS .....	63
3.3 ESTIMATIVA TEÓRICA DE GERAÇÃO DE BIOGÁS.....	66
3.4 ESTIMATIVA DA EMISSÃO DE GASES PELA CAMADA DE COBERTURA .....	67
<b>3.4.1 Cravação da placa de fluxo.....</b>	<b>68</b>
<b>3.4.2 Leitura na placa de fluxo e no tubo de PVC .....</b>	<b>69</b>
<b>3.4.3 Cálculo do fluxo dos gases .....</b>	<b>71</b>
<b>3.4.4 Caracterização do solo de cobertura .....</b>	<b>71</b>
3.5 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS.....	72
3.6 ANÁLISES DOS RESULTADOS.....	72
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>73</b>
4.1 ATERRO SANITÁRIO DE IÇARA.....	73
<b>4.1.1 Caracterização do biogás gerado nos drenos.....</b>	<b>73</b>

4.1.2 Estimativa teórica da geração de metano.....	81
4.1.3 Emissões de biogás pela camada de cobertura .....	81
4.1.3.1 Caracterização da camada de cobertura.....	81
4.1.3.2 Fluxo de biogás pela camada de cobertura.....	83
4.2 ATERRO SANITÁRIO DE TIJUQUINHAS .....	89
4.2.1 Caracterização do biogás gerado nos drenos .....	89
4.2.2 Estimativa teórica da geração de metano.....	95
4.2.3 Emissões de biogás pela camada de cobertura .....	96
4.2.3.1 Caracterização da camada de cobertura.....	96
4.2.3.2 Fluxo de biogás pela camada de cobertura.....	98
<b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....</b>	<b>107</b>
5.1 CONCLUSÕES .....	107
5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	111
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE A - DADOS ATERRO DE IÇARA.....</b>	<b>118</b>
<b>APÊNDICE B - DADOS ATERRO DE TIJUQUINHAS .....</b>	<b>121</b>



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA

A disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários consiste em uma das técnicas adequadas mais utilizadas no Brasil. Nesse tipo de disposição ocorre o tratamento do material depositado através da decomposição anaeróbia do material orgânico. Entretanto, esse tipo de tratamento tem como resultado a produção de efluentes líquidos (lixiviado) e gasosos (biogás), que quando não coletados e tratados adequadamente podem ocasionar poluição do ar, do solo e da água.

O biogás é uma mistura gasosa combustível, resultante da biodegradação da matéria orgânica pela ação de bactérias em meio anaeróbio. A formação do biogás é um processo natural que ocorre em pântanos, mangues, lagos e rios. Esse processo pode ocorrer também pela biodegradação de resíduos orgânicos, como dejetos de animais, lodo de esgoto, resíduos domésticos e agrícolas, efluentes industriais e plantas aquáticas. Este gás tem como principais constituintes metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), tendo o primeiro um potencial 21 vezes maior no aprisionamento do calor na atmosfera (efeito estufa).

Estimativas das emissões globais de metano do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 1996) apontam que  $3,6 \times 10^8$  t/ano são gerados por fontes antropogênicas, sendo que 5 a 20% desse total (entre  $1,8 \times 10^7$  e  $7,2 \times 10^7$  t/ano) são provenientes de aterros sanitários.

O Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa no Brasil, elaborado pela CETESB (2006), revela que as duas maiores fontes de produção de metano são os aterros sanitários e o tratamento anaeróbio de esgoto e águas residuárias. As emissões totais de metano provenientes do tratamento de resíduos totalizaram 803.000 toneladas em 1994 e destes a maior parcela (pouco mais de 84%) foi atribuída às emissões provenientes dos aterros.

Por outro lado, os gases naturalmente produzidos nos aterros, podem ser utilizados na geração de energia, e adicionalmente, negociados através do Protocolo de Quioto. Assim, aterros sanitários que tratem seus gases pela queima (transformação do metano em dióxido de carbono) ou pelo aproveitamento da energia poderão ser remunerados financeiramente por

isto. Leite, Mahler e Brito Filho (2005), afirmam que com o capital oriundo do biogás se espera o rápido desenvolvimento da atividade de construção de aterros sanitários e recuperação de lixões e aterros controlados no país.

O desenvolvimento deste trabalho teve o intuito de atender às demandas de outros estudos já desenvolvidos pelo Laboratório de Resíduos Sólidos (LARESO), com a coordenação do professor Armando Borges de Castilhos Junior em conjunto com o Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA), ambos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Este trabalho contou com o apoio financeiro das instituições FAPESC (Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica do Estado de Santa Catarina – Projeto “Potencialidades da contribuição de Santa Catarina na redução de gases de efeito estufa através da conversão de metano em dióxido de carbono”) e FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – Projeto “Redução dos gases de efeito estufa através do aproveitamento do biogás proveniente de resíduos sólidos”).

## 1.2 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TRABALHO

Visto que na maioria dos municípios brasileiros (63,6% - IBGE, 2000) os resíduos sólidos urbanos são dispostos de maneira inadequada, a possibilidade de recursos a partir do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) poderá servir de estímulo para que as prefeituras tomem medidas para solucionar este grave problema ambiental. Neste contexto, torna-se necessário o estudo de alternativas que viabilizem economicamente a implantação deste tipo de destinação dos resíduos nos municípios brasileiros. Além disso, o aproveitamento do biogás contribui com o setor energético e, essa recuperação energética ou apenas a queima do gás com a mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

Desta forma o estudo mais aprofundado de aspectos relevantes ao biogás de aterros sanitários como a sua produção, composição, emissões fugitivas pela camada de cobertura e potencial energético tornam-se imprescindíveis. Estes aspectos são importantes para verificar a viabilidade do aproveitamento energético do biogás e/ou implantação de projetos de MDL. No ano de 2008 o Brasil ocupava o 3º lugar em número de atividades de projetos de MDL,

com 318 projetos (8%), sendo que em primeiro lugar encontrava-se a China com 1.413 e, em segundo, a Índia com 1.118 projetos (MCT, 2008).

Assim, com esta pesquisa puderam-se avaliar questões relativas ao biogás de aterros sanitários como produção, composição e emissões pela camada de cobertura em dois aterros de resíduos sólidos urbanos do Estado de Santa Catarina.

Tendo posse dessas informações a empresa administradora, através de um estudo de viabilidade econômica, terá uma idéia mais precisa de ganhos potenciais em função da venda de créditos de carbono ou do aproveitamento energético. Além das vantagens econômicas citadas, há ainda vantagens sociais e ambientais, tais como a redução na emissão de gases de efeito estufa que a conversão do gás metano proporciona e a melhoria das condições sanitárias do aterro onde se pretenda implantar um projeto de aproveitamento do biogás, melhorando o meio ambiente no qual o mesmo está inserido.

## 1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

### 1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi estudar as emissões de biogás nos aterros sanitários de Içara e Tijuquinhas.

### 1.3.2 Objetivos específicos

A fim de atingir o objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos para os aterros sanitários de Içara e Tijuquinhas:

1. Determinar a vazão e a composição do biogás gerado atualmente nos drenos de gás;
2. Calcular a geração teórica de biogás através de um modelo matemático variando os parâmetros de potencial de geração de biogás ( $L_0$ ) e taxa de geração de biogás ( $k$ );
3. Verificar qual das curvas teóricas se adéqua a emissão atual;

4. Quantificar o fluxo de biogás pela camada de cobertura com ensaios de placa de fluxo estática.

#### 1.4 METODOLOGIA

A metodologia proposta para esta pesquisa foi baseada na pesquisa bibliográfica realizada sobre o assunto, em artigos técnicos, livros, relatórios, dissertações de mestrado e teses de doutorado. A aplicação da metodologia foi realizada nos aterros de resíduos sólidos urbanos de Içara e de Tijuquinhas, ambos localizados no Estado de Santa Catarina, e consistiu na análise das emissões de biogás provenientes da degradação dos resíduos através dos drenos e da camada de cobertura.

A caracterização do biogás nos drenos consistiu no diagnóstico da vazão e composição em campo. A curva de geração teórica de metano foi obtida a partir de um dos modelos presentes na literatura, ajustando-se a mesma para os valores obtidos em campo através de variações dos parâmetros de potencial de geração de biogás ( $L_0$ ) e taxa de geração de biogás ( $k$ ). O cálculo do fluxo de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  sobre a camada de cobertura foi obtido com ensaios de placa estática. Maiores detalhes serão apresentados no capítulo 3 referente à metodologia deste trabalho.

#### 1.5 LIMITAÇÕES

A aplicação da metodologia proposta nesta pesquisa limita-se aos dois aterros do Estado de Santa Catarina que foram estudados.

A estimativa da geração de metano dos aterros foi calculada a partir de um dos modelos presentes na literatura por ser um dos modelos mais utilizados em projetos de aproveitamento energético. Os valores obtidos se devem aos parâmetros utilizados, podendo ser encontrados outros valores para outros modelos ou parâmetros escolhidos.

Em um dos aterros delimitou-se as medições aos drenos de biogás que fazem parte do projeto de captura e queima do gás.

## 1.6 ESTRUTURA

A pesquisa está estruturada em 05 capítulos, além das referências bibliográficas e apêndices.

No capítulo 1 foram apresentados o tema abordado, as justificativas e a importância do trabalho, os objetivos geral e específicos, a metodologia, suas limitações e a estrutura da pesquisa.

O capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica acerca dos resíduos sólidos urbanos, aterros sanitários, biogás de aterros sanitários e MDL.

Em seguida, o capítulo 3 trata dos aterros estudados e a metodologia aplicada nos mesmos.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e as discussões da aplicação da metodologia proposta nos dois aterros de resíduos sólidos do estudo.

O capítulo 5 foi destinado às conclusões do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Na seqüência foram apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para a elaboração do trabalho, assim como os Apêndices com os dados apresentados no capítulo 4.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A revisão baseou-se em pesquisas bibliográficas sobre os resíduos sólidos e sua destinação, particularmente em aterros sanitários e os aspectos relacionados ao biogás, um dos produtos resultantes da degradação do material orgânico presente nos aterros sanitários. Na seção 2.1 será mostrada a revisão teórica acerca dos resíduos sólidos quanto à sua classificação, composição, taxa de geração e destinação final. A seção 2.2 apresenta os principais elementos essenciais a um aterro sanitário. A formação do biogás, sua composição, taxa de geração e fatores interferentes, estimativas teóricas, fluxo pela camada de cobertura e potencial energético são apresentados na seção 2.3. Finalmente, abordou-se sobre o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) na seção 2.4.

### **2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS**

Da atividade humana, seja ela de qualquer natureza, resultaram sempre materiais diversos. O aumento das quantidades de resíduos sólidos tem sido atribuído ao constante crescimento das populações urbanas, à forte industrialização e, à melhoria no poder aquisitivo dos povos, principalmente nas grandes cidades (BIDONE; POVINELLI, 1999). Os resíduos sólidos são considerados como todo material gerado pelas atividades humanas, industrial ou de consumo, cujo valor econômico seja desprezível ao seu possuidor.

Os resíduos sólidos constituem-se de resíduos nos estados sólido e semi-sólido resultantes das atividades humanas tais como industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, incluindo ainda os lodos de estações de tratamento e líquidos que não possam ser lançados na rede pública de esgoto (NBR 10004 - ABNT, 2004).

#### **2.1.1 Classificação dos resíduos**

Dentre as várias formas de classificação dos resíduos sólidos, D'Almeida e Vilhena (2000) destacam: quanto à natureza ou origem, quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente,

quanto a sua natureza física (seco ou molhado) e quanto a sua composição química (matéria orgânica e inorgânica).

Em relação à natureza ou origem, D'Almeida e Vilhena (2000) apresentam a seguinte classificação:

- Domiciliar: gerado em residências, constituídos geralmente por restos de alimentos, produtos deteriorados, jornais e revistas, garrafas, embalagens em geral, papel higiênico, e diversos outros itens, podendo conter resíduos tóxicos;
- Comercial: gerado em estabelecimentos comerciais e de serviços, tais como supermercados, lojas, restaurantes, etc. São, normalmente, constituídos de papel, plásticos, embalagens diversas, etc.;
- Público: gerado pelos serviços de limpeza pública urbana e de áreas de feiras livres. Os resíduos de limpeza pública são geralmente constituídos dos resíduos de varrição de vias públicas, limpeza de praias, galerias, córregos e terrenos, restos de podas de árvores, além de corpos de animais e outros e, os resíduos das feiras livres constituídos principalmente por restos vegetais diversos e embalagens;
- Serviços de saúde e hospitalar: gerados por hospitais, clínicas, laboratórios, farmácias, clínicas veterinárias, postos de saúde, etc. Dentre esses materiais estão agulhas, seringas, gazes, bandagens, algodões, órgãos e tecidos removidos, meios de culturas, animais usados em testes, sangue coagulado, luvas descartáveis, etc;
- Portos, Aeroportos, Terminais Rodoviários e Ferroviários: são constituídos pelos resíduos sépticos, que são os resíduos que contêm ou tem potencial para conter germes patogênicos. São constituídos por restos de alimentos e material de higiene pessoal que podem veicular doenças provenientes de outras cidades, estados ou países;
- Industrial: originado pelas atividades dos diversos ramos industriais, tais como metalúrgica, química, petroquímica, papelaria, alimentícia, etc. Apresenta características diversificadas, podendo ser exemplificados por cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos e ácidos, plásticos, papéis, madeiras, fibras, borrachas, metais, vidros, cerâmicas, etc.;
- Resíduos agrícolas: gerados nas atividades pecuárias e agrícolas como embalagens de fertilizantes e de defensivos agrícolas, ração, restos de colheita, etc.;
- Entulho: resíduos gerados pela construção civil, compostos por materiais de demolição, restos de obras, solos de escavações diversas, etc. É composto por materiais passíveis de reaproveitamento e de materiais tóxicos como tintas, solventes e peças de amianto.

Quanto à classificação dos resíduos sólidos referente aos seus riscos potenciais, estes são classificados pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) em perigosos (classe I) e não perigosos (classe II). Por sua vez, os resíduos de classe II são divididos em não inertes (classe II A) e inertes (classe II B). Os resíduos da classe I podem apresentar riscos à saúde pública devido às suas características, tais quais inflamabilidade, corrosividade, toxicidade e patogenicidade. Os resíduos da classe II não apresentam riscos ao ser humano e ao meio ambiente, sendo considerados inertes aqueles que quando submetidos a testes de solubilização não tenham nenhum de seus componentes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de águas. Finalmente, os resíduos que não se enquadram na classe I ou classe II B são denominados não inertes e, podem ter como propriedades combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Os resíduos podem ainda ser classificados quanto ao seu grau de degradabilidade (BIDONE; POVINELLI, 1999) sendo: facilmente degradáveis (matéria orgânica), moderadamente degradáveis (papéis, papelão e material celulósico), dificilmente degradáveis (pedaços de pano, retalhos, aparas e serragens de couro, borracha e madeira) e não degradáveis (vidros, metais, plásticos, pedras, terra, etc.). Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993) dividem os constituintes dos resíduos orgânicos em rapidamente biodegradáveis (3 meses a 5 anos) e lentamente biodegradáveis (até 50 anos ou mais) conforme Tabela 1.

**Tabela 1. Velocidade de degradação dos constituintes dos resíduos orgânicos.**

<b>Componentes dos resíduos orgânicos</b>	<b>Rapidamente biodegradáveis</b>	<b>Lentamente biodegradáveis</b>
Restos de alimentos	X	
Papel	X	
Papelão	X	
Têxteis		X
Borracha		X
Couro		X
Resíduos de jardim	X <sup>(a)</sup>	X <sup>(b)</sup>
Madeira		X

**Fonte:** Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993).

<sup>(a)</sup> Folhas e capim, cerca de 60% dos resíduos de jardim.

<sup>(b)</sup> Frações de madeira dos resíduos de jardim.



A seguir, conforme o foco desta pesquisa, as discussões serão dirigidas aos resíduos sólidos urbanos (RSU). Estes resíduos englobam os materiais de origem domiciliar, de estabelecimentos de comércio, de serviços, de varrição e de feiras livres, sendo de atribuição e responsabilidade exclusiva das prefeituras, desde a coleta até a destinação final.

### **2.1.2 Composição dos RSU**

Cassini, Vazoller e Pinto (2003) afirmam que as características dos RSU estão condicionadas a uma série de fatores, desde as condições climáticas da região, que influenciam diretamente a qualidade e a quantidade dos resíduos sólidos, até a densidade populacional e suas condições sociais e econômicas. O poder aquisitivo da população, por exemplo, pode ser um dos fatores que influencia a composição gravimétrica dos RSU, bem como sua produção *per capita*.

Os RSU são constituídos basicamente por matéria orgânica putrescível, papel/papelão, podas de árvores e gramados, plástico, vidro, material metálico ferroso e não ferroso, ossos e demais tipos de resíduos muitas vezes denominados de material inerte, dependendo dos critérios de caracterização física ou gravimétrica (CASSINI; VAZOLLER; PINTO, 2003). Na Tabela 2 pode ser observada a composição gravimétrica dos RSU em doze cidades brasileiras.

**Tabela 2. Composição gravimétrica (%) dos RSU de algumas cidades brasileiras.**

Cidade	Matéria orgânica	Papel e papelão	Plástico	Metais	Vidro	Outros
Campina Grande <sup>(a)</sup> (PB)	56,8	13,6	15,5	1,5	1,1	11,5
Belo Horizonte <sup>(a)</sup> (MG)	65,4	10,2	11,6	2,6	2,5	7,7
Ouro Preto <sup>(a)</sup> (MG)	53,7	19,3	9,2	4,2	4,2	9,4
Vitória <sup>(a)</sup> (ES)	53,1	19,1	11,8	2,7	2,7	10,0
Rio de Janeiro <sup>(b)</sup> (RJ)	44,0	23,0	12,0	4,0	2,0	15,0
Botucatu <sup>(b)</sup> (SP)	74,1	7,6	8,4	3,9	2,0	4,0
Criciúma, Içara e Nova Veneza <sup>(b)</sup> (SC)	45,2	21,1	17,1	2,1	2,1	11,2
Florianópolis <sup>(b)</sup> (SC)	46,4	14,2	14,9	2,6	4,1	17,8
Caxias do Sul <sup>(a)</sup> (RS)	58,8	17,3	6,6	2,9	1,3	13,7
Porto Alegre <sup>(b)</sup> (RS)	52,1	15,0	12,4	2,5	1,9	16,0
<b>Média</b>	<b>55,0</b>	<b>16,0</b>	<b>12,0</b>	<b>2,9</b>	<b>2,4</b>	<b>11,6</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>9,4</b>	<b>4,8</b>	<b>3,3</b>	<b>0,9</b>	<b>1,0</b>	<b>4,1</b>

**Fontes:** <sup>(a)</sup>Leite et al. (2003); <sup>(b)</sup>Orofino (2002).

### 2.1.3 Taxa de geração dos RSU

A taxa de geração dos resíduos sólidos urbanos é a quantidade de lixo gerada por habitante num período de tempo especificado, refere-se aos volumes efetivamente coletados e à população atendida. D'Almeida e Vilhena (2000) a consideram como de importância fundamental para o planejamento de todo o sistema de gerenciamento de resíduos, principalmente do dimensionamento de instalações e equipamentos. Os fatores de geração consistem, basicamente, na taxa de geração por habitantes e no nível de atendimento dos serviços públicos do município. As equações referentes à estimativa das gerações de resíduos sólidos atual e futura, em kg/dia, são apresentadas a seguir através das Equações 1 e 2, respectivamente.

$$\text{Geração atual} = A \times B \times C_0 \quad (1)$$

$$\text{Geração futura} = A \times (1 + D)^n \times B \times (1 + E)^n \times C_t \quad (2)$$

Em que:

- $A$  é a população atual, em habitantes;
- $B$  é a geração *per capita* de lixo, em kg/habitante.dia;
- $C_0$  é o nível de atendimento atual dos serviços de coleta do lixo, em %;
- $D$  é a taxa de crescimento populacional, em %;
- $E$  é a taxa de incremento da geração *per capita* de lixo, em %;
- $C_t$  é o nível de atendimento dos serviços de coleta de lixo após  $n$  anos, em %;
- $n$  é o intervalo de tempo considerado, em anos.

A geração *per capita* pode variar conforme o tamanho das cidades segundo IBGE (2000). Em cidades com até 200 mil habitantes, os valores estão entre 0,45 e 0,70 kg/habitante.dia e nas cidades acima de 200 mil habitantes, essa quantidade aumenta para a faixa entre 0,8 e 1,2 kg/habitante.dia. Estes valores são próximos aos encontrados por Orofino (2002) para a cidade de Florianópolis, em Santa Catarina, com população superior a 200 mil habitantes. Esta pesquisadora encontrou os valores de 0,87 kg/habitante.dia na alta temporada (dezembro a fevereiro) e 0,73 kg/habitante.dia na baixa temporada (março a novembro).

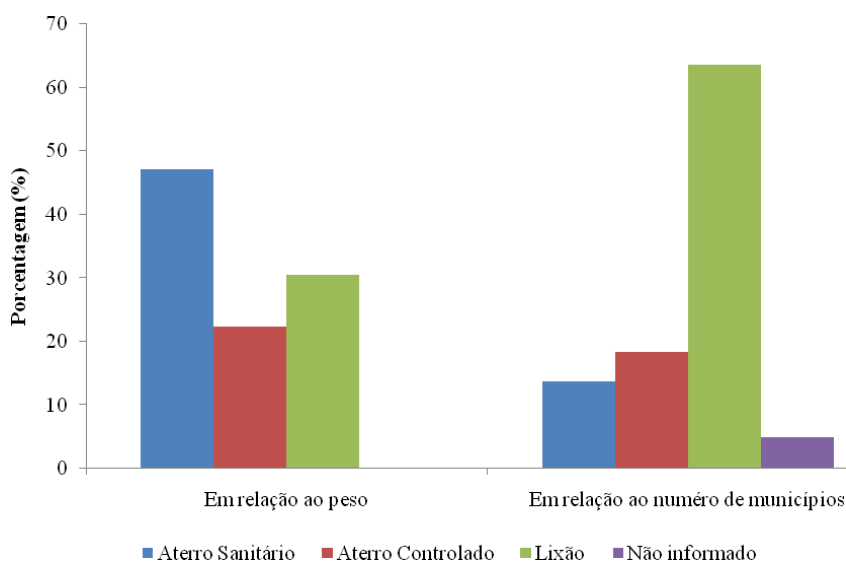
#### 2.1.4 Destinação final dos RSU

Um dos principais problemas relacionados aos RSU ainda consiste na falta de destinação adequada em muitos municípios brasileiros, a qual de acordo com Castilhos Jr. e Reichert (2007) resulta em problemas ambientais (poluição do solo, da água e do ar), sociais (existência de catadores), econômicos (desvalorização do uso do solo local e vizinho) e de saúde pública (contaminações por vias diretas e indiretas).

O equacionamento e a solução dos problemas relacionados aos resíduos urbanos, em todas as etapas do processo, desde a geração até a disposição final, estão intrinsecamente ligados à população envolvida, ao seu estágio de desenvolvimento, aos hábitos, às condições econômicas e, naturalmente, à disponibilidade de locais e tecnologias adequadas para tratamento e disposição final. A preocupação com o volume dos resíduos gerados, bem como com as possibilidades de aproveitamento dos materiais potencialmente recicláveis, ainda é

incipiente, sendo raras as iniciativas dos poderes públicos voltadas à conscientização e à mobilização da comunidade (MENDES, 2005). Castilhos Jr. e Reichert (2007) apontam como pontos essenciais a vontade e decisão política, o conhecimento técnico, pessoal qualificado e motivado, recursos financeiros e participação popular ou social para o sucesso na implementação de um novo aterro sanitário.

Dos cerca de 162 mil toneladas de RSU coletados diariamente no país, 30,5 % são dispostos em lixões segundo os dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) realizada no ano de 2000 (IBGE, 2000) que podem ser verificados na Figura 1. A mesma pesquisa revela piores resultados em relação ao número de municípios: 63,6% dispõem seus resíduos em vazadouros a céu aberto (lixões). O termo “lixão” é definido por D’Almeida e Vilhena (2000) como uma forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos municipais, caracterizada pela simples descarga sobre o solo, ignorando medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública.



**Figura 1. Destinação final dos RSU coletados.**

**Fonte:** Adaptado de IBGE (2000).

Ainda segundo a pesquisa citada, aproximadamente 76 mil toneladas de resíduos (47,1%) são dispostos em aterros sanitários, sendo considerado por Castilhos Jr. et al. (2003) como a técnica de disposição adequada dos RSU atualmente mais utilizada, e que apresenta o menor custo. A NBR 8419 (ABNT, 1992, p.1) preconiza a seguinte definição para aterro sanitário:

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

Embora cerca de 50% dos resíduos, coletados em peso, sejam destinados adequadamente, em se tratando da destinação quanto ao número de municípios, esse valor cai para 13,8%. Isso se explica pelo fato da maior parte dos municípios brasileiros possuírem população inferior a 20 mil habitantes não possuindo verba para a implantação e/ou manutenção de um aterro sanitário.

D'Almeida e Vilhena (2000) definem aterro controlado como uma técnica semelhante ao aterro sanitário, entretanto, o mesmo geralmente não possui impermeabilização de base (o que compromete a qualidade das águas subterrâneas) e sistemas de tratamento e coleta de lixiviado ou do biogás gerado, sendo preferível ao lixão, porém de qualidade bastante inferior ao aterro sanitário.

Um estudo realizado por Jucá (2002) observou que as regiões Sul e Sudeste são as que possuem a maior quantidade de resíduos destinados em aterros sanitários, 40,5% e 37,1%, respectivamente. Segundo o mesmo autor, a grande dificuldade na implantação de aterros sanitários reside nos custos de operação que pressupõe tratamento adequado de líquidos e gases efluentes, além de todos os demais cuidados previstos nas normas técnicas.

Em pesquisa realizada pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina (SDM, 2001) verificou-se que a disposição dos resíduos sólidos em aterros sanitários licenciados pelo órgão de controle ambiental do Estado (FATMA – Fundação do Meio Ambiente) representava apenas 16,5% dos resíduos gerados pela população urbana. Com o intuito de reverter essa situação, o Ministério Público de Santa Catarina implantou em 2001 o programa “Lixo nosso de cada dia” que através de medidas aplicadas nos municípios em situação irregular, conseguiu após 3 anos de programa modificar a situação verificando a disposição adequada em pouco mais de 95% do total dos municípios catarinenses (ABES/SC, 2006).

## 2.2 ATERROS SANITÁRIOS

O aterro sanitário além de ser uma forma de disposição dos resíduos, também é considerado como uma forma de tratamento da matéria orgânica presente nos resíduos (TEIXEIRA, 2000). A técnica de destinação definida como aterro sanitário pode ser entendido, de acordo com Castilhos Jr. e Reichert (2007), como um reator bioquímico, em que as principais entradas são os resíduos sólidos e água de chuva. Já as principais saídas são o biogás e o lixiviado gerados na degradação dos resíduos, tendo como armazenamento dentro do “reator” a matéria orgânica parcialmente biodegradada e os materiais inorgânicos dispostos inicialmente. Os autores apresentam os requisitos mínimos que devem estar presentes no projeto e na operação de um sítio de disposição para que o mesmo possa ser considerado um aterro sanitário, sendo estes: bom isolamento hidrogeológico, ser concebido e operado como uma obra de engenharia, ter permanente controle por pessoal qualificado, ter um plano detalhado de disposição e cobertura dos resíduos.

Diversas vantagens desse tipo de destinação e tratamento são citadas, dentre elas (ABES, 1999 *apud* KROETZ, 2003; LIMA, 1991):

- Disposição dos resíduos de forma adequada;
- Capacidade de absorção diária de grande quantidade de resíduos;
- Condições especiais para a decomposição biológica da matéria orgânica presente nos resíduos;
- Possibilidade de utilização de áreas topograficamente inutilizadas;
- Controle da proliferação de vetores, tais como ratos e artrópodes;
- Custos inferiores aos de usinas de compostagem e instalações de incineração.

E, como desvantagens pode-se citar (ABES, 1999 *apud* KROETZ, 2003; LIMA, 1991):

- Possibilidade de poluição das águas superficiais e lençóis subterrâneos pelo lixiviado;
- Formação de gases nocivos e odor desagradável;
- Possibilidade de transporte de resíduos a longa distância;
- Desvalorização imobiliária das áreas destinadas ao aterro e das áreas próximas ao empreendimento;
- Produção de águas residuárias;
- Período longo de estabilização do solo do aterro.

Teixeira (2000) considera que um aterro sanitário deverá apresentar os seguintes elementos de projeto para proteção ambiental: impermeabilização de fundo e das laterais, drenagem e tratamento do lixiviado, drenagem e tratamento dos gases, drenagem de águas pluviais, compactação e cobertura diária dos resíduos.

### *Impermeabilização de fundos e laterais*

A impermeabilização de fundo e das laterais garante o confinamento dos resíduos e lixiviados gerados, e impede a infiltração de poluentes no subsolo e aquíferos adjacentes (CASTILHOS JR; REICHERT, 2007). Dependendo da profundidade do nível d'água e de sua variação sazonal deverá ser projetado um sistema de drenagem de fundação para coleta das águas naturais do subsolo. Este sistema deverá ser acessado pelo sistema de monitoramento ambiental a fim de atestar as suas condições de desempenho durante a vida útil do aterro, inclusive após o seu fechamento (D'ALMEIDA; VILHENA, 2000).

A Figura 2 demonstra a colocação de manta de PEAD (Polietileno de alta densidade), utilizada como forma de impermeabilização em aterros sanitários.



**Figura 2. Colocação da manta PEAD**

**Fonte:** Santec Resíduos (2008)

### *Drenagem e tratamento de lixiviado*

Os lixiviados gerados com a degradação dos resíduos devem ser canalizados para fora do sistema de disposição a fim de receberem o tratamento adequado. A drenagem desse líquido pode ser projetada de forma a propiciar a sua percolação através da massa de resíduos sólidos, ocasionando a aceleração do processo de biodegradação do material orgânico (GOMES; MARTINS, 2003).

Lima (1991) cita os seguintes processos de tratamento para os lixiviados: recirculação ou irrigação, lagoas de estabilização, ataques químicos, filtros biológicos, processos fotossintéticos, processos mistos. Atualmente, a evaporação do lixiviado com o aproveitamento energético do biogás vem sendo altamente empregada e pesquisada (CADAVID PÉREZ, 2004; HENRIQUES, 2004; USEPA, 1998).

### *Drenagem e tratamento de gases*

O sistema de drenagem de gases deve ser projetado para evitar formações de bolsões dentro da massa de resíduos, os quais poderão causar explosões ou incêndios locais (GOMES; MARTINS, 2003). Além disso, a drenagem dos gases garante a estabilidade física do maciço de resíduos. Os drenos verticais geralmente são construídos em secção cilíndrica de brita envolta por telas de gabião conforme Figura 3. Os drenos horizontais são construídos associados aos drenos verticais e facilitam a drenagem dos gases pela massa de resíduo, podendo ser interligados ao sistema de drenagem de lixiviados (D'ALMEIDA; VILHENA, 2000). O tratamento do biogás poderá ocorrer através da queima diretamente nos drenos verticais ou ainda pode ser coletado e direcionado para sistemas centralizados de queimadores ou aproveitamento energético (MANDELLI, 1991).





**Figura 3. Sistema de drenagem de gases.**

**Fonte:** Santec Resíduos (2008).

#### *Drenagem de águas pluviais*

Para Gomes e Martins (2003) o sistema de drenagem superficial (Figura 4) tem a função de evitar a entrada de águas de chuva e aumento do volume de lixiviados. Evita também a erosão que pode causar a destruição da camada de cobertura e taludes. Segundo D’Almeida e Vilhena (2000), as águas pluviais não devem ser misturadas ao lixiviado gerado nos aterros, pois este necessita de tratamento mais complexo antes de ser lançado à drenagem natural.



**Figura 4. Drenagem de águas pluviais.**

**Fonte:** Santec Resíduos (2008).

### *Sistema de cobertura*

O sistema de cobertura (diário, intermediário e final) tem a função de eliminar a proliferação de vetores, diminuir a taxa de formação de lixiviados, reduzir a exalação de odores e impedir a saída descontrolada do biogás (D'ALMEIDA; VILHENA, 2000). A cobertura diária é realizada ao final de cada jornada de trabalho, já a cobertura intermediária é necessária naqueles locais onde a superfície de disposição ficará inativa por mais tempo, aguardando, por exemplo, a conclusão de um patamar para início do seguinte (GOMES; MARTINS, 2003).

A camada de cobertura dos resíduos é o elo entre o lixo e o ambiente atmosférico, tendo grande influência na liberação dos gases, e nas entradas de ar atmosférico e águas pluviais na massa de lixo (JUCÁ, 2003). Hamada (2008) alerta que deve-se ter cuidado na especificação das coberturas diárias e intermediárias, uma vez que respondem pelo consumo de material para cobertura (normalmente terra) e também pela utilização de espaços, que deveriam ser ocupados por resíduos, o que diminui a via útil do aterro.

Gomes e Martins (2003) aconselham a utilização de solos argilo-arenosos como camada de cobertura dos resíduos, pois este tipo de material apresenta menor retração por secagem em relação a solos com teores de argila muito elevados. Segundo Lima (1991), o recobrimento definitivo ou o acabamento final do aterro é indispensável pela necessidade de se incorporar a área aterrada ao meio urbano, podendo sua espessura variar de 0,6 a 1,0 m. Lima (1991) ainda sugere a colocação de uma fina camada de terra fértil, onde algumas espécies vegetais, resistentes à temperatura, possam ser cultivadas.

## 2.3 BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS

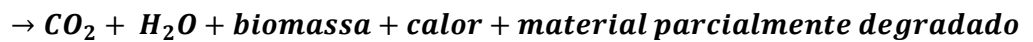
### **2.3.1 Degradação dos RSU e formação do biogás**

A conversão biológica da matéria orgânica em aterros sanitários é a principal responsável pela degradação dos resíduos, resultando na geração de gás (biogás) e no carregamento de moléculas diversas pela água da chuva (lixiviado) (CASTILHOS JR et al., 2003). Os resíduos depositados em aterros sanitários sofrem decomposição na forma aeróbia, enquanto há presença de oxigênio e após a cessão de ar ocorre a decomposição anaeróbia. Os

produtos da decomposição aeróbia são dióxido de carbono, água, nitratos e nitritos, enquanto os produtos da decomposição anaeróbia constituem-se de metano, dióxido de carbono, água, ácidos orgânicos, nitrogênio, amônia, sais de ferro e manganês e sulfato de hidrogênio (MCBEAN; ROVERS; FARQUAR, 1995).

A biodegradação aeróbia é iniciada durante a deposição dos resíduos nos aterros perdurando até certo período após a colocação da camada de cobertura, enquanto houver presença de oxigênio. Na etapa aeróbia predominam fungos, *streptomices* e bactérias fotossintéticas (CASTILHOS JR et al., 2003). Essa fase é rápida em relação à decomposição anaeróbia (MCBEAN; ROVERS; FARQUAR, 1995) e segue conforme a relação a seguir:

***Resíduo degradável + O<sub>2</sub>***



Neste processo, McBean, Rovers e Farquar (1995) relatam que os microrganismos aeróbios elevam a temperatura da massa de resíduos a valores de até 70°C produzindo níveis elevados de dióxido de carbono de até 90%, o que acaba acidificando o pH dos lixiviados devido a formação de ácido carbônico (Equação 3).

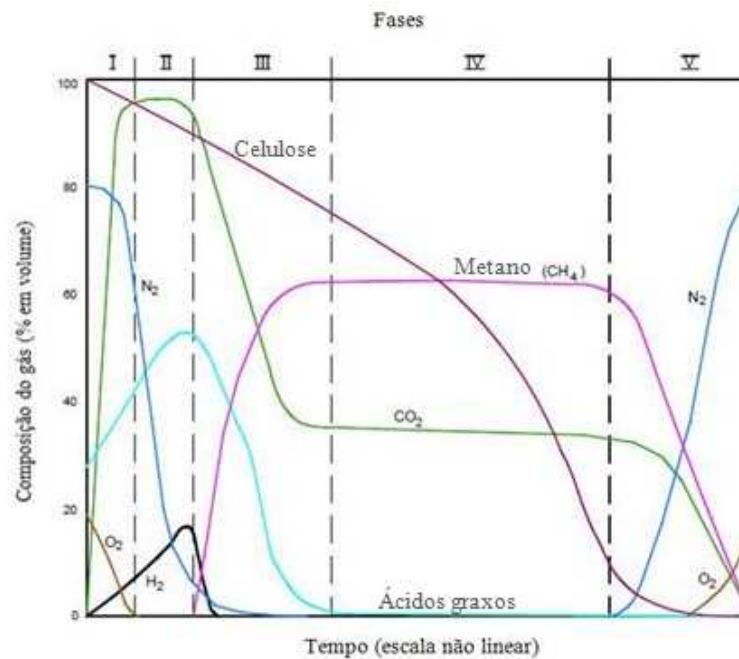


O restante da degradação se dá sob ambiente anaeróbio. Os consórcios microbianos presentes em sistemas anaeróbios de aterramento de resíduos são responsáveis pela seqüência das etapas de degradação: hidrólise de polímeros, fermentação de ácidos orgânicos e mineralização final dos resíduos com a etapa de metanogênese (CASTILHOS JR et al., 2003).

O processo da decomposição dos resíduos orgânicos e formação do biogás pode ser melhor entendido e estudado quando dividido em cinco fases (ESMAP, 2004; EMCON, 1998; TCHOBANOGLOUS; THEISEN; VINIL, 1993), as quais podem ser observadas na Figura 5. Serpa e Lima (1984) *apud* Vanzim, 2006 relatam que a duração de cada fase na produção do biogás depende de alguns fatores, como a distribuição da matéria orgânica no aterro, a disponibilidade de nutrientes, o teor de umidade dos resíduos e o grau de compactação inicial dos mesmos, podendo o processo total levar de 10 a 80 anos ou mais (ESMAP, 2004; QIAN; KOERNER; GRAY, 2002).

A fase inicial (I) compreende a decomposição biológica da matéria orgânica que ocorre principalmente em condições aeróbias, devido à presença de certa quantidade de ar no interior do aterro, e sua duração pode levar de algumas horas a uma semana (ESMAP, 2004;

QIAN; KOERNER; GRAY, 2002). A principal fonte de microrganismos para a decomposição aeróbia e anaeróbia nessa fase é a terra que é usada como material de cobertura para divisão das células do aterro e como camada final (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993). Nesta fase a temperatura na massa de resíduos varia de 30°C a 70°C, o pH fica acima de 7,0 e o potencial de óxido redução varia de 800 mV a 100 mV (SERPA; LIMA, 1984 *apud* VANZIM, 2006). Segundo Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993), a produção do metano ocorre entre -150 mV a -300 mV.



**Figura 5. Fases da produção do biogás.**

Fonte: ESMAP (2004).

Na fase II as reações anaeróbias se desenvolvem devido ao decaimento da quantidade de oxigênio. Assim, nitratos e sulfatos tornam-se receptores de elétrons nas reações biológicas de conversão (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993). A duração dessa fase é de 1 a 6 meses (ESMAP, 2004; QIAN; KOERNER; GRAY, 2002).

Na fase III as reações são aceleradas com a produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos e quantidades menores de gás hidrogênio. Essa fase tem duração de 3 meses a 3 anos (ESMAP, 2004; QIAN; KOERNER; GRAY, 2002). Inicialmente ocorre a transformação enzimática (hidrólise) dos compostos de maior massa molecular (lipídeos, polissacarídeos, proteínas e ácidos nucleicos) em compostos apropriados para o uso como fonte de energia pelos microrganismos (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993).

Em seguida, esses compostos são convertidos em compostos intermediários com massa molecular menor, como o ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) e pequenas concentrações de outros ácidos mais complexos. O dióxido de carbono é o principal gás gerado durante esta fase e os microorganismos envolvidos nesta conversão, descritos como não metanogênicos, são constituídos por bactérias anaeróbias estritas e facultativas (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993). Nesta fase ocorrem quedas do potencial de óxido-redução com valores inferiores a  $-100$  mV, do pH que fica entre 5,2 a 6,5 e a temperatura oscila entre  $29^\circ\text{C}$  a  $45^\circ\text{C}$  (SERPA; LIMA, 1984 *apud* VANZIM, 2006).

A fase IV, em que há predominância de organismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, é a mais longa podendo durar de 8 a 40 anos (ESMAP, 2004; QIAN; KOERNER; GRAY, 2002). As bactérias metanogênicas convertem ácido acético e gás hidrogênio em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida consideravelmente (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VINIL, 1993). As características dessa fase são temperatura entre  $22$  a  $37^\circ\text{C}$ , pH entre 6,8 a 7,2, e potencial de óxido redução em torno de  $-300$  mV (SERPA; LIMA, 1984 *apud* VANZIM, 2006).

A última fase (V) ocorre após grande quantidade de material orgânico ter sido biodegradado e convertido em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . Segundo Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993), como a umidade continua a migrar pela massa de lixo, porções de material biodegradável, ainda não convertidos, acabam reagindo. A taxa de geração do gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta. Essa fase tem duração de 1 a 40 anos ou mais (ESMAP, 2004; QIAN; KOERNER; GRAY, 2002), temperatura inferior a  $30^\circ\text{C}$ , pH entre 7,0 a 7,2 e, potencial de óxido redução variando entre  $-330$  mV a  $-600$  mV (SERPA; LIMA, 1984 *apud* VANZIM, 2006).

Castilhos Jr. et al. (2003) consideram que embora essa divisão do processo de digestão anaeróbia em fases facilite o entendimento dos fenômenos de estabilização biológica dos resíduos sólidos urbanos e seus impactos sobre as emissões gasosas, na prática, durante a vida de um aterro, essas fases não são tão bem definidas. Isto ocorre na medida em que sempre há o aterramento de resíduos sólidos novos, causando grande variabilidade na idade do material disposto, não sendo difícil encontrar as três fases ocorrendo simultaneamente em um único aterro.

### 2.3.2 Composição do biogás

O biogás de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos é composto por vários gases, sendo seus principais constituintes o gás metano ( $\text{CH}_4$ ) e o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). A pequena diferença existente entre a concentração de gás metano e dióxido de carbono encontrada no biogás se deve à dissolução de parte do  $\text{CO}_2$  na fração aquosa da massa de resíduos (GUNNERSON; STUCKEY, 1986). Os valores típicos de seus constituintes e suas concentrações citados por diversos autores são apresentados a seguir (Tabela 3).

**Tabela 3. Principais constituintes do biogás.**

Componentes	% Volume		
	Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993)	Qian, Koerner e Gray (2002)	McBean, Rovers e Farquar (1995)
Metano ( $\text{CH}_4$ )	45 - 60	45 - 58	50 - 70
Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )	40 - 60	35 - 45	30 - 50
Nitrogênio ( $\text{N}_2$ )	2 - 5	< 1 - 20	-
Oxigênio ( $\text{O}_2$ )	0,1 - 1,0	< 1 - 5	-
Mercaptanas, Sulfitos, Disulfitos, etc.	0 - 1,0	-	0,1 - 1 <sup>(a)</sup> < 2 <sup>(b)</sup>
Amônia	0,1 - 1,0	-	-
Hidrogênio ( $\text{H}_2$ )	0 - 0,2	< 1 - 5	< 5
Monóxido de Carbono ( $\text{CO}$ )	0 - 0,2	-	-
Traços de outros constituintes	0,01 - 0,6	< 1 - 3	-

**Notas:** <sup>(a)</sup>Valor referente às mercaptanas;

<sup>(b)</sup>Valor referente ao disulfeto de hidrogênio.

Em Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993) são apresentadas as variações das concentrações de nitrogênio, dióxido de carbono e metano em uma célula de um aterro sanitário durante os primeiros 48 meses após o seu encerramento (Tabela 4).

No estudo de Allen et al. (1997) *apud* Castilhos Jr. et al. (2003) realizado em sete aterros sanitários da Inglaterra foram identificados 140 compostos orgânicos voláteis (COVs), sendo que 90 deles foram detectados em todos os aterros amostrados. As concentrações e seus respectivos grupos de compostos podem ser verificados na Tabela 5. Além dos compostos

apresentados, em três dos sete aterros sanitários monitorados foram detectados organoclorados em concentrações próximas de  $250 \text{ mg/m}^3$ , e o composto mais tóxico encontrado nesses aterros foi o cloroetano, em concentrações que variaram de 0,1 a  $87 \text{ mg/m}^3$ .

**Tabela 4. Variação das concentrações em uma célula concluída.**

Intervalo de tempo desde a conclusão da célula, em meses	Média (% em volume)		
	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
0 - 3	5,2	88	5
3 - 6	3,8	76	21
6 - 12	0,4	65	29
12 - 18	1,1	52	40
18 - 24	0,4	53	47
24 - 30	0,2	52	48
30 - 36	1,3	46	51
36 - 42	0,9	50	47
42 - 48	0,4	51	48

**Fonte:** Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993).

**Tabela 5. Compostos orgânicos voláteis do biogás.**

Grupos de Compostos	Concentração ( $\text{mg/m}^3$ )
Alcanos	302 – 1.543
Compostos Aromáticos	94 – 1.906
Ciclo-Alcanos	80 - 487
Terpenos	35 - 652
Álcoois e Cetonas	2 – 2.069
Compostos Halogenados	327 – 1.239

**Fonte:** Allen et al. (1997) *apud* Castilhos Jr. et al. (2003).

### 2.3.3 Taxa de geração do biogás

O volume total de biogás produzido pode variar amplamente durante todo o tempo de decomposição, devido principalmente à quantidade total de matéria orgânica contida nos resíduos dispostos no aterro (QIAN; KOERNER; GRAY, 2002). Em condições normais, a taxa de produção de gás, atinge um pico nos primeiros dois anos e diminui lentamente, continuando em muitos casos, por períodos de até 25 anos ou mais, conforme relatam Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993). Quanto ao tempo, aterros secos em climas áridos, por exemplo, podem gerar um valor mínimo de gás por um longo período de tempo, podendo chegar a 100 anos; já em aterros com matéria orgânica úmida, a geração de biogás é muito rápida, variando de 8 a 15 anos (QIAN; KOERNER; GRAY, 2002).

Castilhos Jr. et al. (2003) consideram que as taxas de produção de biogás em aterros sanitários são mais difíceis de avaliar do que em laboratório ou em células que simulam aterros sanitários (ou lisímetros). Os autores (CASTILHOS JR et al., 2003) citam como método mais empregado na determinação das quantidades de gás produzido a leitura dos volumes diretamente nos poços de captação dos aterros sanitários. Os resultados de produção obtidos em aterros sanitários dos Estados Unidos podem ser verificados na Tabela 6.

**Tabela 6. Taxa de produção de gás em aterros sanitários.**

Aterro Sanitário	Quantidade de resíduos (10 <sup>6</sup> kg)	Superfície (10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> )	Número de poços	Profundidade dos poços (m)	Taxa de produção (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )
Azuza	6.350	0,3	41	48,7	0,002
Mountain View	3.628	1,01	33	13,3	0,008
Sheldon-Arletta	5.450	0,16	14	33,0	0,014
Palos Verdes	18.143	0,17	12	45,7	0,001
Scholl Canyon	4.500	0,18	27	56,1	0,006

**Fonte:** Castilhos Jr. et al. (2003).

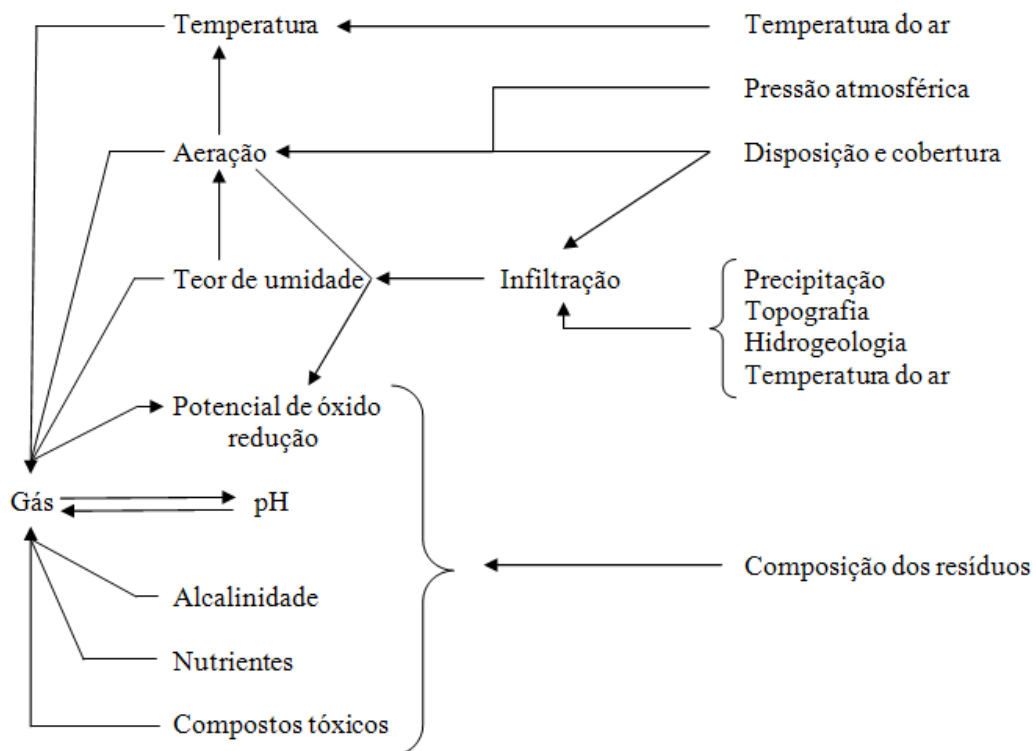
Em um aterro antigo, em condições totalmente anaeróbias, o potencial de geração de biogás pode variar de 2,5 m<sup>3</sup>/t de resíduos por ano a um valor máximo 8,74 m<sup>3</sup>/t de resíduos por ano (QIAN; KOERNER; GRAY, 2002). El-Fadel, Findikakis e Leckie (1997) citam valores de potencial de geração de biogás entre de 0 a 400 m<sup>3</sup>/t para o resíduo seco. Estes valores caem para 0 a 240 m<sup>3</sup>/t de resíduo aterrado com umidade média de 40%. Essa faixa é condizente com o valor de 200 m<sup>3</sup>/t de resíduo úmido apresentado por Aitchison (1996).



Entretanto, os autores Ham e Barlaz (1989) encontraram valores que variaram entre 50 e 400 m<sup>3</sup>/t de resíduos em aterros de grande porte.

### 2.3.4 Fatores interferentes na geração do biogás

A taxa de geração do biogás de aterros pode ser influenciada por diversos fatores inerentes aos resíduos, tais como composição, umidade, idade, temperatura e pH (USEPA, 1991). Para El-Fadel, Findikakis e Leckie (1997), os fatores mais comuns são composição, umidade, temperatura, pH, disponibilidade de bactérias e nutrientes e presença de agentes inibidores na célula. Os mesmos autores também citam outros aspectos relacionados com a geometria e operação do aterro e com o ambiente externo à célula. A relação entre esses fatores é apresentada por McBean, Rovers e Farquar (1995) na Figura 6.



**Figura 6. Fatores que afetam a produção do biogás.**  
(Adaptado de McBean, Rovers e Farquar, 1995)

#### *Composição dos Resíduos*

A taxa de geração de gases será maior quanto maior a porcentagem de materiais biodegradáveis. Sua quantidade pode variar ao longo do ano dependendo do clima e dos

hábitos de consumo da população local (USEPA, 1991). Quanto maior a quantidade de resíduos orgânicos de fácil degradação, como os restos de alimentos, mais rápida será a taxa de geração do gás. Alguns resíduos biodegradáveis, como grandes peças de madeira decompõem-se lentamente e não contribuem significativamente na produção do biogás (QIAN; KOERNER; GRAY, 2002).

### *Umidade*

A umidade da massa de resíduos é o principal fator que influencia a geração de biogás em aterros sanitários (EL-FADEL; FINDIKAKIS; LECKIE, 1997; PALMISANO; BARLAZ, 1996; MCBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995). Segundo USEPA (1991), a construção do aterro com baixa permeabilidade, para controle da formação do lixiviado, mantém a umidade dos resíduos baixa e prejudica a formação do biogás. A relação entre a infiltração e o teor de umidade pode ser verificada no esquema da Figura 6.

Outros autores relatam a influência da chuva na umidade dos resíduos, Junqueira (2000) relata que verificou variações bruscas de temperatura na massa de resíduos em períodos chuvosos, e que estas variações favorecem a desestabilização dos microrganismos anaeróbios, provocando uma diminuição na velocidade de degradação da matéria orgânica. Já em USEPA (1991) é relatado que para valores altos de umidade, entre 60 a 90%, pode ocorrer o aumento da geração de biogás.

### *Idade dos resíduos*

Qian, Koerner e Gray (2002) descrevem que a geração do metano é dependente de duas variáveis temporais: *lag time* (período da disposição dos resíduos até o início da geração de metano – início da fase III) e *conversion time* (período da disposição do resíduo até o fim da geração do metano – final da fase V). Como exemplos os autores citam os resíduos de jardim que apresentam tempos curtos, e couro e plástico com tempos longos.

## *Temperatura*

A temperatura tem importante significado no processo de decomposição de resíduos, pois atua na cinética das reações bioquímicas responsáveis pela conversão dos resíduos em biogás (MONTEIRO, 2003). Variações da temperatura dentro da massa de resíduos ocorrem em zonas menos profundas do aterro devido à influência da temperatura do ar ambiente (QIAN; KOERNER; GRAY, 2002). McBean, Rovers e Farquhar (1995) observaram temperaturas de 70°C há uma profundidade de 15 m, e verificaram que abaixo dessa profundidade não há mais interferência da temperatura do ar.

As condições de temperatura dentro da massa de resíduos influenciam o tipo de bactéria predominante e o nível de produção de biogás, sendo a faixa ótima de temperatura para as bactérias mesofílicas de 30°C a 35°C e para as bactérias termofílicas, às quais produzem maiores taxas de geração, de 45°C a 65°C (QIAN; KOERNER; GRAY, 2002; MCBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995). Temperaturas abaixo de 15°C propiciam severas limitações para a atividade metanogênica, sendo a faixa ótima de temperatura para geração de metano entre 30 a 40°C. As temperaturas do biogás de aterros sanitários foram citadas na faixa entre 30 a 60°C (EMCON, 1981).

### **2.3.5 Estimativas teóricas de geração de biogás**

Os modelos matemáticos são ferramentas úteis e econômicas para avaliar o potencial de geração de gás em um aterro, pois seus resultados podem ser utilizados na avaliação do potencial de emissões e da viabilidade de projetos de gestão do gás (ESMAP, 2004). Castilhos Jr. et al. (2003) concordam ao afirmar que a previsão da geração de biogás é de fundamental importância para estimar o balanço energético e econômico de instalações de recuperação de gás, e afirmam que diferentes métodos são utilizados para esta previsão, como os métodos estequiométricos e modelos matemáticos.

Nesta seção são apresentadas as metodologias de estimativa de geração de metano apresentadas pela USEPA (1991), ESMAP (2004) e IPCC (1996). As duas primeiras metodologias têm em comum a utilização de equações cinéticas de primeira ordem, e todas elas consideram os mesmos parâmetros de entrada:

- Massa de resíduos depositada anualmente no aterro;
- Tempo de atividade do aterro e/ou após o fechamento;

- Taxa de geração de metano ( $k$ );
- Potencial de geração de metano ( $L_0$ ).

O potencial de geração de metano ( $L_0$ ) depende da composição dos resíduos e das condições do aterro para o processo de decomposição (USEPA, 1991). Quanto maior a quantidade de material orgânico presente na massa de resíduos, maior será o valor de  $L_0$  (ESMAP, 2004). Os valores encontrados na literatura para aterros americanos são de 6,2 a 270 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/t de resíduos, sendo recomendado o valor de 100 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/t de resíduos (USEPA, 1991). Na Tabela 7 podem ser visualizados os valores máximos e mínimos sugeridos por ESMAP (2004) a partir do tipo de resíduo, sendo que o mesmo sugere o valor de 170 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/t de resíduos.

**Tabela 7. Valores sugeridos para  $L_0$ .**

<b>Categorização do resíduo</b>	<b>Valor mínimo (m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t)</b>	<b>Valor máximo (m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t)</b>
Relativamente inerte	5	25
Moderadamente inerte	140	200
Altamente degradável	225	300

**Fonte:** ESMAP (2004).

A taxa de geração de metano ( $k$ ) está relacionada com o tempo de geração do biogás, e é influenciada pelo teor de umidade, composição dos resíduos, pH, temperatura e disponibilidade de nutrientes para o processo anaeróbico (ESMAP, 2004). Os valores sugeridos para  $k$  em função da precipitação anual estão apresentados na tabela a seguir (Tabela 8). USEPA (1991) e ESMAP (2004) sugerem para  $k$  os valores de 0,04 ano<sup>-1</sup> e 0,06 ano<sup>-1</sup>, respectivamente.

**Tabela 8. Valores de  $k$  (ano<sup>-1</sup>), em função da precipitação.**

<b>Precipitação anual (P, em mm)</b>	<b>Material relativamente inerte</b>	<b>Material moderadamente degradável</b>	<b>Material altamente degradável</b>
< 250	0,01	0,02	0,03
250 < P < 500	0,01	0,03	0,05
500 < P < 1000	0,02	0,05	0,08
> 1000	0,02	0,06	0,09

**Fonte:** ESMAP (2004).

### 2.3.5.1 Decaimento de primeira ordem – USEPA (1991)

USEPA (1991) apresenta o método denominado “Decaimento de Primeira Ordem”, e o indica para estimativas de casos individuais ou para regiões e países inteiros (Equação 4).

$$Q_{CH_4} = L_0 \times R \times (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (4)$$

Em que:

- $Q_{CH_4}$  é a geração de gás metano no ano, em m<sup>3</sup>/ano;
- $L_0$  é o potencial da geração de metano dos resíduos, em m<sup>3</sup>/t de resíduos;
- $R$  é a taxa de deposição média anual de resíduo durante a vida útil do aterro, em t/ano;
- $k$  é a constante de decaimento, em ano<sup>-1</sup>;
- $c$  é o tempo desde o fechamento do aterro (anos), sendo  $c$  igual a 0 para aterros ativos;
- $t$  é o tempo desde o início de deposição do resíduo (anos).

Na Equação 4, enquanto o aterro recebe resíduos, a variável  $c$  será zero, e o termo  $e^{-kc}$  será igual a 1 e o valor de  $R$  será a média de deposição de resíduo até o fechamento do aterro. Após o seu fechamento, o aterro continuará a gerar biogás e a variável  $c$  deverá ser considerada.

### 2.3.5.2 *School Canyon*

ESMAP (2004) apresenta o modelo *School Canyon* (Equação 5) como o modelo empírico de decomposição mais amplamente aceito, sendo utilizado pela indústria e por agências reguladoras, inclusive a EPA (*Environmental Protection Agency*) norte-americana.

$$Q_{CH_4i} = k \times L_0 \times m_i \times e^{-kt_i} \quad (5)$$

Em que:

- $Q_{CH_4i}$  é a vazão de metano produzida no ano  $i$ , em m<sup>3</sup>/ano;

- $k$  é a constante de decaimento, em ano<sup>-1</sup>;
- $L_0$  é o potencial da geração de metano dos resíduos, em m<sup>3</sup>/t de resíduos;
- $m_i$  é a massa de resíduos depositada no ano  $i$ , em t;
- $t_i$  é a quantidade de anos após o fechamento, em anos.

ESMAP (2004) ao apresentar esse modelo em seus cálculos para projetos de energia de aterros na América Latina e no Caribe justifica sua escolha pelo fato do modelo ser adequado ao objetivo pretendido, além de ser o mais empregado e aceito nas Américas do Norte e do Sul, de fácil aplicação e ser aceito pelas agências e instituições financeiras que estão interessadas em apoiar esse tipo de projeto.

### 2.3.5.3 IPCC

O cálculo proposto por IPCC (1996), apresentado pelas Equações 6 e 7, considera a estimativa do percentual de carbono orgânico degradável e sua fração distinta presente na massa de resíduo, determinando deste modo a quantidade de metano que pode ser gerada por determinada quantidade de resíduo depositado, onde se considera diferentes categorias de resíduos sólidos urbanos.

$$Q_{CH_4} = (Pop_{urb} \times Taxa\ RSD \times RSD_f \times L_0 - R) \times (1 - OX) \quad (6)$$

$$L_0 = FCM \times COD \times COD_F \times F \times \left(\frac{16}{12}\right) \quad (7)$$

Em que:

- $Q_{CH_4}$  é a emissão de metano, em t de CH<sub>4</sub>/ano;
- $Pop_{urb}$  é a população urbana ou atendida, em número de habitantes;
- $Taxa\ RSD$  é a taxa de geração de resíduos sólidos domésticos por habitante por ano, em t/habitante.ano;
- $RSD_f$  é a fração de resíduos sólidos domésticos que é depositada em locais de disposição de resíduos sólidos, fração adimensional;

- $L_0$  é o potencial da geração de metano dos resíduos, em t de  $\text{CH}_4/\text{t}$  de resíduos;
- $R$  é a quantidade de metano recuperado, em t de  $\text{CH}_4/\text{ano}$ ;
- $OX$  é o fator de oxidação de metano na superfície do aterro, fração adimensional;
- $FCM$  é o fator de correção de metano, fração adimensional;
- $COD$  é a fração de carbono orgânico degradável, fração adimensional ou t de C/t de RSD;
- $COD_f$  é a fração de COD que realmente degrada, fração adimensional;
- $F$  é a fração de  $\text{CH}_4$  biogás, fração adimensional;
- $16/12$  é a taxa de conversão de carbono em metano, fração adimensional ou t de  $\text{CH}_4/\text{t}$  de C.

#### *Fator de oxidação (OX)*

De acordo com IPCC (1996) o fator de oxidação ( $OX$ ) é a quantidade de metano que se oxida no solo ou em outros materiais que cobrem os resíduos. Segundo alguns estudos, os aterros sanitários tendem a expressar resultados de oxidação mais altos que os lixões, porém ainda não existem valores aceitos internacionalmente e, na ausência de dados, se assume um valor igual a 10%.

#### *Determinação do fator de correção de metano (FCM)*

Os valores do fator de correção de metano ( $FCM$ ) são propostos em função do tipo de aterramento, considerando que os resíduos depositados de forma adequada e com maiores profundidades terão melhores condições de decomposição anaeróbia, produzindo assim maiores quantidades de metano, conforme Tabela 9.

**Tabela 9. Valores de FCM sugeridos por IPCC (1996).**

<b>Tipo de local</b>	<b>Valores de FCM</b>
Adequado	1,0
Inadequado - profundo ( $\geq 5,0$ m de resíduos)	0,8
Inadequado - raso ( $< 5,0$ m de resíduos)	0,4
Sem classificação	0,6

*Carbono Orgânico Degradável (COD)*

O carbono orgânico degradável (*COD*) é a fração acessível para a decomposição bioquímica, baseada na composição e na quantidade de carbono de cada componente presente na massa de resíduos conforme Tabela 10, e seu cálculo é feito a partir dessa relação conforme Equação 8.

$$COD = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,30 \times D) \quad (8)$$

Em que:

- *A* é a fração de papel, e papelão e tecido nos RSU;
- *B* é a fração de resíduos de parques e jardins nos RSU;
- *C* é a fração de restos de alimentos nos RSU;
- *D* é a fração de madeira nos RSU.

**Tabela 10. Valores de COD em função do tipo de resíduo.**

<b>Componentes</b>	<b>Valores de COD (% em massa)</b>
Papel , papelão e tecido (A)	40
Resíduos de parques e jardins (B)	17
Restos de alimentos (C)	15
Madeira (D)	40

**Fonte:** IPCC (1996).

O IPCC (1996) recomenda um valor de 0,12 de *COD* para casos que não sejam conhecidas as frações dos resíduos.



### *Fração do carbono orgânico degradável assimilado ( $COD_F$ )*

O  $COD_F$  corresponde à fração do carbono orgânico degradável disponível para decomposição bioquímica e que é convertida em biogás, seu valor é calculado em função da temperatura na zona anaeróbia através da Equação 9.

$$COD_f = (0,014 \times T) + 0,28 \quad (9)$$

Em que:

- $T$  é a temperatura na zona anaeróbia, em °C.

Como a temperatura na zona anaeróbia, na disposição de resíduos sólidos, permanece constante, em torno de 35°C, na ausência de dados o IPCC propõe um valor de 0,77 para o  $COD_F$ .

### **2.3.6 Fluxo de biogás pela camada de cobertura**

Uma parcela das emissões de metano provenientes de aterro sanitários escapa por fissuras da camada de cobertura. Em seus estudos, Börjesson et al. (2000) observaram que os locais de emissão se movem com o tempo, devido ao processo de degradação dos resíduos, às mudanças de umidade afetando as características de difusão e o transporte do gás e uma provável oxidação de metano por bactérias presentes na superfície da camada de cobertura.

Dentre os fatores considerados influentes na permeabilidade do solo aos gases pode-se citar a umidade de compactação, a estrutura do solo, o grau de saturação à água e o conteúdo volumétrico do ar (MARIANO, 2008; MACIEL, 2003).

Entre os métodos para mensurar as emissões de gás que atravessam a camada de cobertura de aterros de RSU estão placas de fluxo (estática ou dinâmica) e análises por sistema infravermelho. Estes métodos têm o objetivo de avaliar a eficiência da camada de cobertura na retenção do biogás produzido pelos resíduos aterrados. Nos estudos comparativos de Czepiel et al. (1996) foram verificados resultados semelhantes entre as câmaras estáticas e sensores de infravermelho.

As placas de fluxo utilizadas em investigações de emissões de gases são câmaras fechadas, que restringem a passagem de ar liberado pelo solo para a atmosfera, de modo que

as mudanças de concentração no gás dentro da câmara possam ser medidas. A partir dos resultados da variação das concentrações dos gases no tempo, estima-se o fluxo de gases emitidos para a atmosfera (HUTCHINSON; LIVINGSTON, 1993; COSSU et al., 1997). As vantagens e desvantagens desse tipo de medição são apresentadas por Maciel (2003). Entre as vantagens o autor destaca: método de maior precisão em emissões pontuais, baixo custo, simples instalação, permite avaliação simultânea de diversos gases; e, dentre as desvantagens: necessita de inúmeros ensaios para obtenção da emissão total do aterro e tempo prolongado de ensaio (aproximadamente 2 horas).

Nas placas dinâmicas os gases no interior da placa são diluídos através de um fluxo contínuo de ar para serem em seguida analisados e por fim dispersados na atmosfera, sendo consideradas como fluxo aberto (MACIEL, 2003). A Figura 7 ilustra um esquema de placa de fluxo dinâmica.



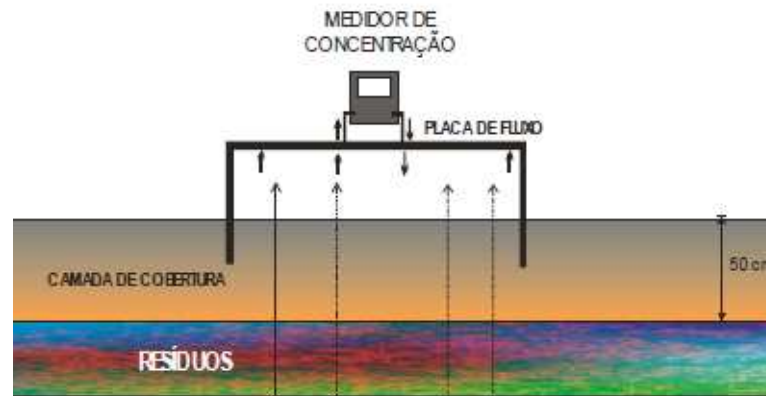
**Figura 7. Esquema de placa de fluxo dinâmica.**

Fonte: Guedes (2007).

O cálculo do fluxo é feito controlando-se a vazão de entrada ( $Q_{entrada}$ ) de um gás inerte e a vazão de saída ( $Q_{saída}$ ) devido à pressão do sistema, ou ainda através de um medidor de concentrações para verificar as variações dos gases no decorrer do ensaio. A vazão da camada de cobertura ( $Q_{solo}$ ) é calculada através da equação a seguir (Equação 10).

$$Q_{solo} = Q_{saída} - Q_{entrada} \quad (10)$$

Nas placas estáticas (Figura 8), os gases são analisados sem diluição e retornam em seguida para a placa em um ciclo fechado, sem renovação de ar. Após sua instalação no solo, iniciam-se as leituras das concentrações dos gases em tempos determinados (normalmente de 10 em 10 minutos), até que ocorra a estabilização nas leituras.



**Figura 8. Esquema da placa de fluxo estática.**  
**Fonte:** Guedes (2007).

O fluxo de gás, ou taxa de emissão superficial, determinada pelo método estático, pode ser calculada através da Equação 11 (CZEPIEL et al.,1996):

$$J = \frac{V_p \times \rho_{gás}}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta T} \quad (11)$$

Em que:

- $J$  é o fluxo do gás, em  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ;
- $V_p$  é o volume útil da placa de fluxo, em  $\text{m}^3$ ;
- $\rho_{gás}$  é a densidade do gás a determinada temperatura, em  $\text{kg/m}^3$ ;
- $A$  é a área de solo coberta pela placa, em  $\text{m}^2$ ;
- $\Delta C/\Delta T$  é a variação da concentração do gás (%) com o tempo (s).

Como o fluxo decresce com o decorrer, o mesmo poderá ser calculado em termos mássicos ( $\Delta M/\Delta t$ ) conforme apresentado no estudo realizado por Maciel (2003). As equações a seguir (Equações 12 e 13) deverão ser utilizadas para correção da densidade do  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  em função da temperatura:

$$\rho_{\text{CH}_4}(t) = \frac{\rho_{\text{CH}_4}(0^\circ\text{C}) \times 273}{(273+t)} \quad (12)$$

Em que:

- $\rho_{\text{CH}_4}(t)$  é a densidade do  $\text{CH}_4$  em função da temperatura ( $t$ ), em  $^\circ\text{C}$ ;

- $\rho_{CH_4} (0^\circ C)$  é igual a  $0,716\text{kg/m}^3$ .

$$\rho_{CO_2}(t) = \frac{\rho_{CH_4}(t) \times PM_{CO_2}}{PM_{CH_4}} \quad (13)$$

Em que:

- $\rho_{CO_2}(t)$  é a densidade do  $CO_2$  em função da temperatura (t), em  $^\circ C$ ;
- $PM_{CH_4}$  é o peso molecular do  $CH_4$ , igual a 16;
- $PM_{CO_2}$  é o peso molecular do  $CO_2$ , igual a 44.

Cossu et al. (1997) aponta as câmaras estáticas como o método mais comum, de maior simplicidade e menores custos, sendo a mais indicada quando se necessita de uma série de leituras em menor tempo. O autor destaca como prováveis causas de erros nas estimativas de fluxo as perturbações físicas no ambiente, como as variações na temperatura, pressão e concentração dos gases dentro da câmara e modificações na estrutura do solo. Quanto ao tamanho das câmaras, apesar de câmaras maiores terem maior representatividade, é aconselhável áreas de até  $1,0\text{ m}^2$  para evitar problemas de operação e elevados tempos de ensaio (COSSU et al, 1997; DENMEAD; RAUPACH, 1993).

### 2.3.7 Potencial energético

Os gases constituintes do biogás estão entre os principais causadores do efeito estufa e, por essa razão, o biogás gerado deve ser captado sendo aproveitado energeticamente ou simplesmente queimado. A conversão energética do biogás pode ser apresentada como uma solução para o grande volume de resíduos produzidos por atividades agrícolas e pecuárias, destilarias, tratamento de esgotos domésticos e aterros sanitários, visto que reduz o potencial tóxico das emissões de metano ao mesmo tempo em que produz energia elétrica, agregando, desta forma, ganho ambiental e redução de custos (COSTA, 2002).

Henriques (2004) ao avaliar o aproveitamento energético da digestão anaeróbica acelerada, da incineração e do biogás de resíduos sólidos, considerou esse último como uma tecnologia ambientalmente mais atrativa, considerando a realidade da gestão dos RSU no Brasil. O autor considera ainda que apesar da elevada ineficiência da planta (40%) e do seu elevado custo de *up grade*, a utilização do biogás tem muito mais efeitos positivos, visto que a

conversão em energia possibilita a recuperação do capital e incrementa a viabilidade econômica da planta, podendo-se dizer que o seu impacto ambiental negativo é inexistente em comparação com o benefício global gerado.

O poder calorífico desse gás varia de acordo com a quantidade de metano existente, atingindo de 5000 a 6000 kcal por metro cúbico. Porém, esse poder pode chegar a 12.000 kcal/m<sup>3</sup> quando da retirada do CO<sub>2</sub> (ZAGO, 2003). A seguir, a Tabela 11 mostra a quantidade de biogás equivalente a uma unidade de outros combustíveis.

**Tabela 11. Comparação entre o biogás e outros combustíveis.**

<b>Biogás (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Outros Combustíveis</b>
1,58 a 2,2	1 L gasolina
1,55 a 2,18	1 L de diesel ou querosene
1,48 a 2,08	1 L de óleo combustível
0,91 a 1,28	1 L de álcool carburante
0,46 a 0,65	1 kg de lenha com 10% de umidade

**Fonte:** LENZ (1980) *apud* ZAGO (2003).

Conpet (1997) apresenta uma comparação entre o biogás e outros gases (Tabela 12), ressaltando a diferença entre eles quanto à origem: enquanto o biogás é obtido por meio da degradação da matéria orgânica os demais gases provêm de processos industriais, excetuando-se o gás natural.

Castilhos Jr. et al. (2003) considera que os possíveis usos para o biogás de aterros sanitários dependerão de características de produção como vazão, pressão, PCI (poder calorífico inferior) e regularidade, e ainda pelas condições impostas pelo utilitário desses gases. Os autores destacam a importância da distância entre o local de produção e o de utilização, a qual deverá ser a menor possível e citam os seguintes usos para o gás: combustível térmico, produção de energia mecânica ou, ainda, fabricação de outro produto energético como vapor ou eletricidade.

**Tabela 12. Comparação entre o biogás e outros gases.**

<b>Tipo de gás</b>	<b>Origem</b>	<b>Peso Molecular</b>	<b>Poder Calorífico (Kcal/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade relativa</b>	<b>Principais componentes</b>
Biogás	Aterros sanitários	27	5.600	0,923	Metano, dióxido de carbono e hidrogênio
Gás natural	Reservatórios de petróleo e de gás	17 a 21	9.300 a 10.900	0,58 a 0,72	Metano e etano
GLP	Destilação de petróleo e processamento de gás natural	44 a 56	24.000 a 32.000	1,5 a 2,0	Propano e butano
Gás de rua	Reforma termo-catalítica de gás natural ou de nafta petroquímica	16	4.300	0,55	Hidrogênio, metano, nitrogênio e monóxido de carbono
Gás de refinaria	Processos de refino de petróleo	24	10.000	0,82	Hidrogênio, nitrogênio, metano e etano

**Fonte:** Conpet (1997).

## 2.4 MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO

Os gases naturalmente produzidos nos aterros podem ser utilizados de forma benéfica para geração de energia, e adicionalmente, negociados através do Protocolo de Quioto. O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), estabelecido por esse Protocolo, prevê a venda de créditos de carbono. Assim, aterros sanitários que tratem seus gases, tanto pela queima (transformação do metano em dióxido de carbono) quanto pelo aproveitamento da energia serão remunerados pela venda de créditos de carbono.

Um estudo realizado pela FGV (2002) descreve como surgiu o MDL, em forma de um guia de orientação. Na Rio 92 foi adotada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – CQNUMC, a qual estabeleceu um regime jurídico internacional para alcançar o objetivo principal de estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera a um nível que possa impedir uma interferência antrópica perigosa no sistema climático. Em seqüência à CQNUMC foi aprovado o Protocolo de Quioto, em 1997, o qual estabeleceu metas de redução em 5% na média das emissões antrópicas, verificadas em 1990,

sendo que as metas deverão ser atingidas no período de 2008 – 2012 (primeiro período do compromisso). Os países que não possuem meta para reduzir emissões são os em desenvolvimento, sendo que as metas de redução foram atribuídas aos países relacionados no Anexo I<sup>1</sup> da CQNUMC, os quais assumiram determinado número de compromissos exclusivos em função de suas responsabilidades históricas. Dentre os mecanismos de implementação de redução está o MDL, o qual é o único que permite a participação de países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil.

Para atingir o objetivo final de mitigação de gases de efeito estufa, é feita a implementação de atividades de projeto nos países em desenvolvimento, que resultem na redução da emissão de gases de efeito estufa ou no aumento da remoção de CO<sub>2</sub>, através de tecnologias mais eficientes. A atividade de projeto tem que contribuir para o desenvolvimento sustentável do país em que será aplicada. Além disso, deve demonstrar benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo, como a mitigação das alterações climáticas. O resultado das atividades de projeto são as Reduções Certificadas de Emissões (RCEs), que também recebe a nomenclatura de Certificados de Emissões Reduzidas (CERs), ou seja, são quantidades relativas a reduções de gases de efeito estufa e/ou remoções de CO<sub>2</sub>. As RCEs são medidas em tonelada métrica de dióxido de carbono equivalente, a qual uniformiza as quantidades dos diversos gases de efeito estufa, o que possibilita que reduções de diferentes gases sejam somadas. Além disso, representam créditos que podem ser utilizados pelos países que ratificaram o Protocolo de Quioto, como forma de cumprimento parcial de suas metas de redução de emissão de gases de efeito estufa.

Até 30 de setembro de 2008, um total de 3.981 projetos encontrava-se em alguma fase do ciclo de projetos do MDL, desses 1.112 já registrados pelo Conselho Executivo do MDL. O Brasil ocupa o 3º lugar em número de atividades de projeto, sendo que a China encontra-se em primeiro lugar seguida da Índia. Dentre as atividades de projeto no Brasil, o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) é atualmente o mais relevante com 66%, seguido pelo metano (CH<sub>4</sub>) com 32% e pelo óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) com 1%. Quanto aos escopos setoriais que envolvem as atividades de projeto no Brasil (Tabela 13), os aterros sanitários representam apenas 9% em número de projetos, porém contribuem com 24% nas reduções anuais das emissões, em toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> (MCT, 2008).

---

<sup>1</sup> O Anexo I é integrado pelas Partes signatárias da Convenção pertencentes em 1990 à OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) e pelos países industrializados da antiga União Soviética e do Leste Europeu, totalizando 41 Partes listadas no Anexo I (FGV, 2002).

Leite, Mahler e Brito Filho (2005), afirmam que com as receitas oriundas do biogás do lixo se espera o rápido desenvolvimento da atividade de construção de aterros sanitários e recuperação de lixões e aterros controlados no país, alterando a situação atual, onde somente algumas grandes cidades possuem este equipamento urbano fundamental para a qualidade do meio ambiente e da saúde humana.

**Tabela 13. Distribuição das atividades de projeto no Brasil por tipo de projeto.**

<b>Projetos em validação/aprovação</b>	<b>Número de projetos</b>	<b>Distribuição dos projetos (%)</b>	<b>Redução anual das emissões (tCO<sub>2</sub>e)</b>	<b>Redução anual das emissões (%)</b>
Energia renovável	150	47	16.431.099	39
Suínocultura	55	17	2.737.322	6
Aterro sanitário	29	9	10.036.702	24
Processos Industriais	7	2	832.946	2
Eficiência energética	21	7	1.490.288	4
Manejo e tratamento de resíduos (outros)	10	3	1.160.797	3
N <sub>2</sub> O	5	2	6.373.896	15
Troca de combustível fóssil	39	12	2.907.977	7
Emissões fugitivas	1	0	34.685	0
Reflorestamento	1	0	262.352	1

**Fonte:** MCT (2008).



### 3. METOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias utilizadas nesta pesquisa. Inicialmente serão apresentados os aterros escolhidos onde se aplicou a presente metodologia. Em seguida, serão detalhadas as metodologias para o diagnóstico das emissões provindas dos drenos e os parâmetros utilizados nos cálculos das emissões de metano, bem como os ensaios realizados na camada de cobertura dos aterros. Finalmente apresenta-se como se obteve as condições climáticas dos locais de estudo e a maneira como foi feito o tratamento dos dados.

#### 3.1 LOCAIS DE ESTUDO

A metodologia dessa pesquisa foi aplicada em dois aterros no Estado de Santa Catarina: aterro sanitário de Içara e aterro sanitário de Tijuquinhas. A escolha do aterro sanitário de Içara se deve ao fato do mesmo ser um aterro novo (início das operações em 2005), e apresentar poucos drenos, 15 no total. Devido ao pequeno número de drenos, foi possível realizar, em várias amostragens, medições em todos os drenos obtendo a estimativa da vazão de biogás do aterro para o ano de 2008, e compará-la ao valor obtido para o mesmo ano na curva de geração do modelo matemático utilizado. Já o aterro sanitário de Tijuquinhas é o maior aterro do Estado e teve aprovado recentemente (agosto de 2008) um projeto de MDL, sendo possível realizar medições nos 34 drenos ligados ao sistema de captação do gás antes (setembro e outubro de 2008) e após (novembro e dezembro de 2008) o início da extração forçada que se deu no mês de outubro de 2008.

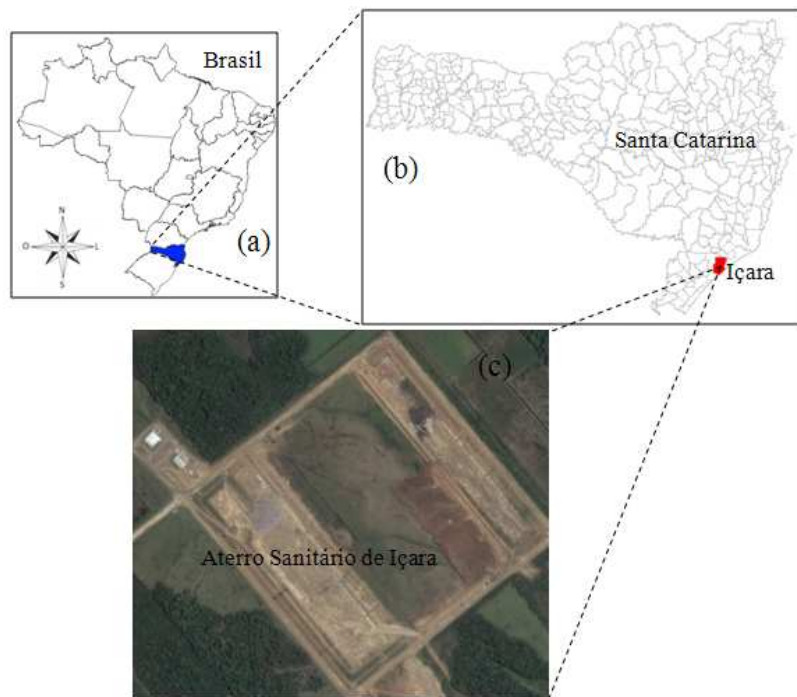
Ressalta-se que ambos os aterros são atraentes para projetos de MDL, que visem a queima do biogás, ou ainda a geração de energia, pois atendem mais de 200 mil habitantes, valor esse considerado por ESMAP (2004) como mínimo para projetos de aproveitamento energético.

Após a seleção dos aterros, foi feito um levantamento dos dados dos aterros, com o objetivo de coletar as informações necessárias para proceder aos cálculos da quantidade produzida de biogás em cada aterro, tais como quantidade anual de recebimento de resíduos

(t/ano), número de drenos, vida útil do aterro e estimativa percentual do aumento anual de resíduos, além de outras informações sobre o aterro as quais serão apresentadas a seguir.

### 3.1.1 Aterro sanitário de Içara

O aterro sanitário da Santec Resíduos, fica localizado no município de Içara, no bairro Poço 8, a 12 km de distância do centro urbano, com acesso pela rodovia federal BR 101, junto ao km 389. A cidade de Içara está localizada no sul do Estado de Santa Catarina a 192 km de Florianópolis, capital do Estado. A cidade possui clima temperado com temperaturas médias que variam entre 18°C e 28°C, nos meses de inverno e verão, respectivamente. A Figura 9 apresenta a localização do aterro sanitário de Içara.



**Figura 9. Localização do aterro sanitário de Içara.**

Fontes: <sup>(a)</sup> [www.mapas.ibge.gov.br](http://www.mapas.ibge.gov.br)

<sup>(b)</sup> [www.mapainterativo.ciasc.gov.br](http://www.mapainterativo.ciasc.gov.br)

<sup>(c)</sup> Google Earth 2008, imagem de outubro de 2007

O aterro entrou em operação em setembro do ano de 2005 com previsão de fechamento no ano de 2025 (20 anos de vida útil). Atualmente recebe resíduos de 24 municípios, com uma média de aproximadamente 7 mil toneladas por mês, e tem um total de mais de 200 mil toneladas de resíduos depositados. A Tabela 14 mostra o fluxo de resíduos desde a abertura, no ano de 2005, até o final de 2008.

**Tabela 14. Fluxo de resíduos no aterro de Içara.**

Ano	Quantidade de resíduos depositados (t)
2005	2.794
2006	56.520
2007	76.291
2008	83.813
<b>Total</b>	<b>219.418</b>

**Fonte:** Santec Resíduos (2008).

O aterro possui todos os elementos necessários para que um aterro seja considerado como sanitário, tais como impermeabilização de base, drenagem e tratamento do lixiviado, drenagem passiva e tratamento dos gases (realizado através da queima), drenagem de águas pluviais, compactação e cobertura diária dos resíduos. A empresa responsável pelo aterro realiza o monitoramento das águas superficiais e subterrâneas, do solo, do ar, dos efluentes, da avifauna e dos ruídos.

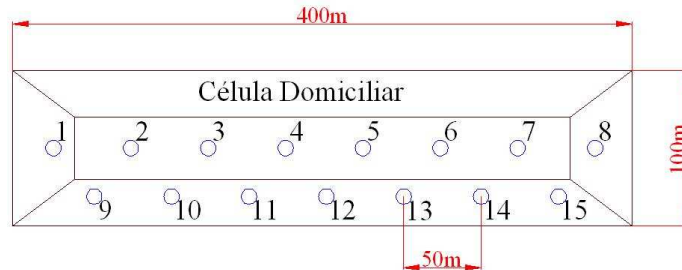
A drenagem dos gases é feita por tubos perfurados de PEAD com 160 mm de diâmetro. Esses tubos são envolvidos por uma camada de pedra tipo rachão suportada por tela de aço e uma camada de geotêxtil. Ao final do tudo de PEAD é acoplado um queimador, em aço galvanizado, para a queima do biogás (Figura 10).



**Figura 10. Dreno de biogás.**

**(a)prolongamento do dreno sobre os resíduos e  
(b)dreno com queimador em camada finalizada.**

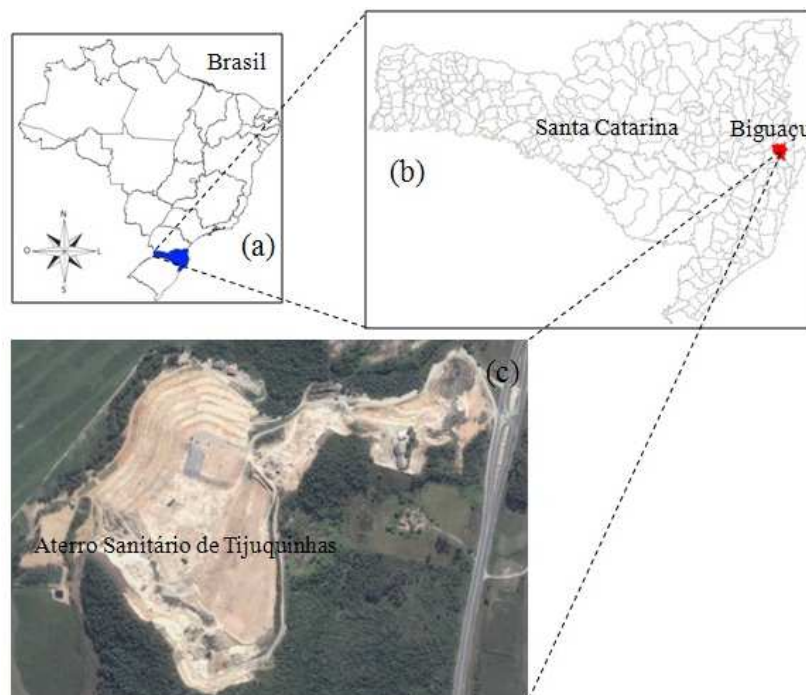
São no total 15 drenos espaçados 50 metros entre si e dispostos conforme esquema apresentado na Figura 11. Os drenos laterais (1 e de 8 a 15) drenam o biogás de 5 metros de profundidade de resíduos, enquanto que os centrais (2 a 7) drenam à 11 metros de profundidade.



**Figura 11. Esquema do aterro com a disposição dos drenos.**

### 3.1.2 Aterro sanitário de Tijuquinhas

O aterro sanitário de Tijuquinhas fica localizado no município de Biguaçu, bairro Areias de Cima, com acesso pela rodovia federal BR 101, junto ao km 178. A cidade de Biguaçu está localizada no litoral central do Estado de Santa Catarina a 28 km de Florianópolis, capital do Estado. A cidade possui clima temperado quente com temperaturas médias que variam entre 15°C e 30°C, nos meses de inverno e verão, respectivamente. A Figura 12 apresenta a localização do aterro sanitário de Biguaçu.



**Figura 12. Localização do aterro sanitário de Tijuquinhas.**

Fontes: <sup>(a)</sup> [www.mapas.ibge.gov.br](http://www.mapas.ibge.gov.br), <sup>(b)</sup> [www.mapainterativo.ciasc.gov.br](http://www.mapainterativo.ciasc.gov.br),

<sup>(c)</sup> Google Earth 2008, imagem de maio de 2006

O início de sua operação se deu no ano de 1991 com provável fechamento no ano de 2013 (22 anos de vida útil). Atualmente recebe resíduos de 21 municípios, totalizando mais de 20 mil toneladas por mês, e apresenta um total de mais de 2 milhões de toneladas de resíduos depositados. A Tabela 15 mostra o fluxo de resíduos desde a abertura, no ano de 1991, até o final de 2008, sendo os valores para o ano de 2007 e 2008 estimativas feitas pela fonte citada.

**Tabela 15. Fluxo de resíduos no aterro de Tijuquinhas.**

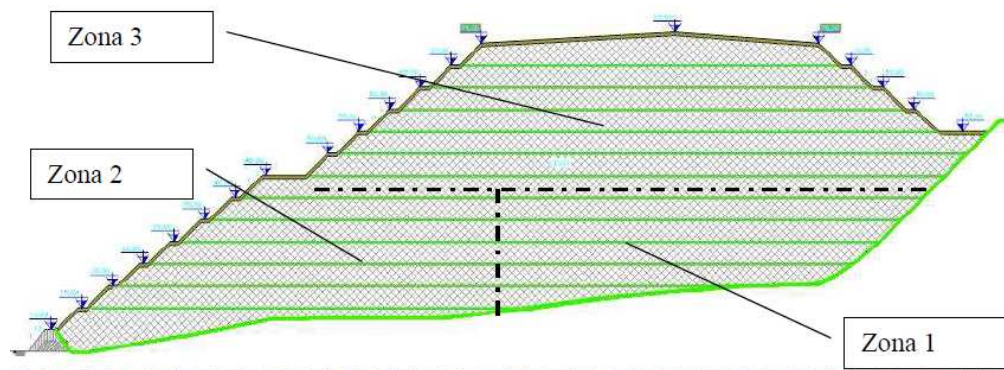
<b>Ano</b>	<b>Quantidade de resíduos depositados (t)</b>
1991	16.179
1992	64.085
1993	69.525
1994	72.336
1995	82.731
1996	93.690
1997	103.529
1998	121.115
1999	126.466
2000	141.175
2001	141.093
2002	181.949
2003	190.430
2004	188.980
2005	236.212
2006	240.936
2007	245.755
2008	250.670
<b>Total</b>	<b>2.566.856</b>

**Fonte:** Proactiva Meio Ambiente Brasil (2007).

Este aterro também possui todos os elementos necessários a um aterro sanitário: impermeabilização de base, drenagem e tratamento do lixiviado, drenagem passiva e ativa e tratamento dos gases (realizado através da queima), drenagem de águas pluviais, compactação

e cobertura diária dos resíduos. A empresa responsável pelo aterro realiza o monitoramento das águas superficiais e subterrâneas, do solo, do ar e dos efluentes.

O aterro de Tijuquinhas é dividido em três zonas conforme a Figura 13. A zona 1 e a zona 2 foram áreas de depósito de 1991 até 2006, tendo sido dispostos aproximadamente 2 milhões de toneladas de resíduos. Acima das zonas 1 e 2 colocou-se uma manta de impermeabilização para coleta do gás dessas áreas. A zona 3 é a área de disposição atual dos resíduos estando sobreposta às zonas antigas, sendo previsto para esse local a deposição de 1,8 milhões de toneladas de resíduos até 2013.



**Figura 13. Esquema do aterro de Tijuquinhas dividido em zonas.**

**Fonte:** Proactiva Meio Ambiente Brasil (2007).

Nas zonas 1 e 2 foram instaladas trincheiras horizontais para coleta do biogás antes da impermeabilização. Este sistema é constituído por tubulações perfuradas de PEAD cercadas de cascalho, com espaçamento de 25 metros em todo o comprimento da zona interligadas com os drenos verticais. Nas laterais da zona 2 existem ainda drenos verticais em ventilação passiva que não fazem parte do sistema de extração forçada. Na zona 3 estão sendo instaladas as mesmas trincheiras de coleta horizontais, a cada 5 metros de profundidade, à medida em que avança a operação do aterro. Esta zona ainda conta com alguns drenos verticais em concreto, instalados por toda a sua área, e interligados às trincheiras horizontais de coleta do gás.

Tendo em vista o elevado número de drenos deste aterro (mais de 100), restringiram-se as medições apenas aos drenos horizontais que fazem parte do projeto de captação de gás. O sistema de extração consiste em 34 drenos horizontais, divididos em duas linhas que podem ser visualizadas na Figura 14: linha 1 (L1) que abrange os drenos de 1 a 19 e linha 2 (L2) que



abrange os drenos 20 a 34. Os drenos da L1 estão na zona 3 e os drenos da L2 fazem parte das zonas 1 e 2.

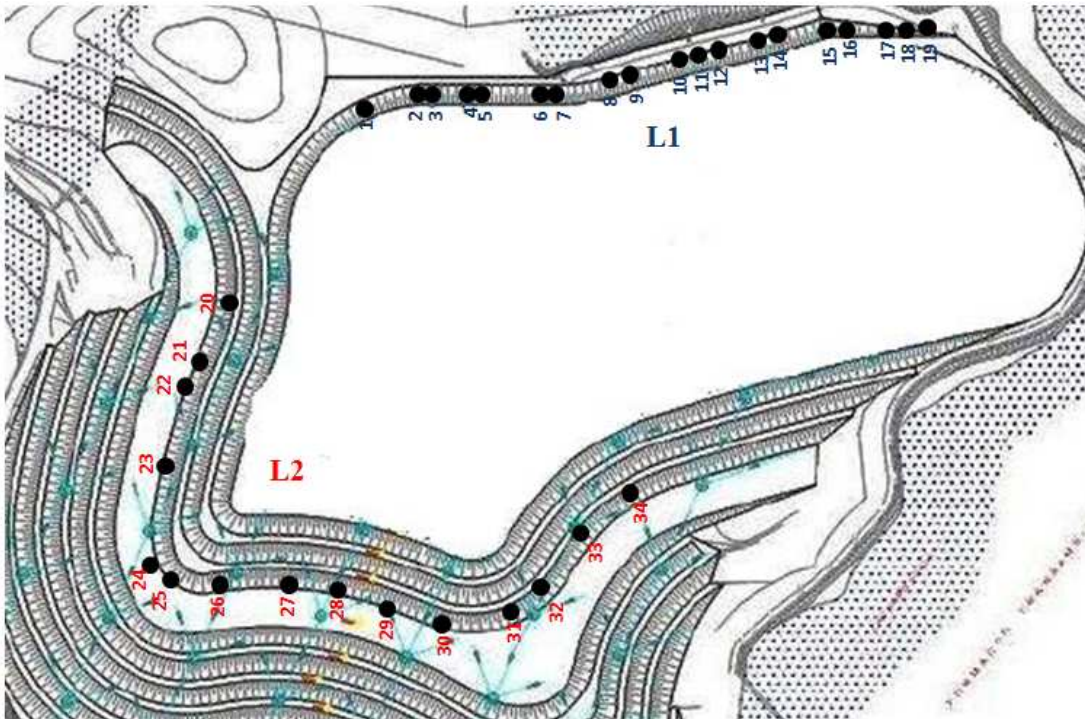


Figura 14. Drenos extração ativa Tijuquinhas.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS GERADO NOS DRENOS

A caracterização do biogás gerado nos drenos dos aterros de Içara e Tijuquinhas foi feita através das medidas de vazão e composição dos gases.

As vazões de biogás nos drenos foram obtidas com os dados de velocidade e temperatura do gás, mensurados em campo, considerando as Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), recomendadas pela IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) e apresentadas em Mills et al. (1993), conforme Equação 14.

$$Q = (V \times A) \times \frac{273,15}{273,15+T} \times P \quad (14)$$

Em que:

- $Q$  é a vazão de biogás, em  $\text{Nm}^3/\text{s}$ ;
- $V$  é a velocidade de saída do biogás, em  $\text{m/s}$ ;

- $A$  é a área da seção de passagem do gás, em  $m^2$ ;
- $T$  é a temperatura de saída do biogás, em  $^{\circ}C$ ;
- $P$  é a pressão atmosférica, em bar.

As velocidades e as temperaturas foram obtidas com um termo-anemômetro digital com sensor de fio quente compensado da empresa Dwyer, modelo 471-2 (Figura 15).



**Figura 15. Termo-anemômetro digital.**

Os dados de pressão atmosférica para correção da vazão, assim como outros dados meteorológicos, foram obtidos em estações experimentais próximas aos aterros conforme descrito na seção 3.5.

Com o objetivo de obter uma seção conhecida e um fluxo de gás com velocidades maiores e uniformes, foi confeccionado um bocal de vazão tipo  $\beta$  reduzido seguindo as recomendações da *American Society of Mechanical Engineers* (DELMÉE, 1983). Para a construção do bocal de fibra de vidro (Figura 16), foi feito primeiramente um molde segundo especificações da norma consultada. Após a confecção deste molde, o mesmo sofreu um tratamento com desmoldante e posterior laminação com manta de fibra de vidro e resina epóxi. Após o tempo de secagem de 24 horas, a peça foi desmoldada e fixada em um tubo de PVC (poli cloreto de vinila) de 200 mm de diâmetro contendo 4 parafusos nas laterais, os quais serviram para fixar o bocal nos drenos a serem estudados. Na saída do bocal foi fixado um tudo de PVC de 80 mm, com um furo lateral de 12 mm de diâmetro para ser introduzido a ponta do termo-anemômetro. Nesta saída do bocal o perfil de velocidades é uniforme, facilitando a obtenção da vazão dos gases produzidos.





**Figura 16. Bocal instalado no dreno.**

As medições da composição do biogás ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ ) foram realizadas em um medidor de concentração de gases (modelo X-am 7000 da Dräger) apresentado na Figura 17.



**Figura 17. Medidor de concentração de gases.**

No aterro de Içara foram realizadas 8 medições de vazão e concentração dos gases em cada dreno no período de 20/05/2008 a 28/08/2008. As medições realizadas no aterro de Tijuquinhas foram divididas em duas fases. Na primeira fase (18/09/2008 a 08/10/2008) foram realizadas 3 medições em cada dreno para os cálculos de vazão de biogás, conforme procedimento descrito acima, antes do início da extração forçada do gás. A segunda fase (06/11/2008 a 12/12/2008) ocorreu após o início da extração forçada, sendo realizadas 6 medições sem o uso do bocal, pois nas tubulações de cada dreno havia um orifício para esse fim.

### 3.3 ESTIMATIVA TEÓRICA DE GERAÇÃO DE BIOGÁS

Existem várias metodologias teóricas para calcular as emissões de metano provindas de depósitos de resíduos sólidos, sendo que algumas delas foram apresentadas na seção 2.3.5 dessa dissertação. O método *School Canyon*, apresentado pela Equação 5, da seção 2.3.5.2, foi o escolhido para aplicação nos aterros desta pesquisa, pois de acordo com ESMAP (2004), é o mais aplicado em projetos de energia para aterros sanitários.

Para os valores de massa de resíduos depositados em ambos os aterros a partir do ano de 2009 até o fechamento foi considerado um aumento de 2% em relação ao ano anterior, sugerido pelas empresas responsáveis pelos aterros.

Em relação à constante de decaimento ( $k$ ) e ao potencial de geração de metano ( $L_0$ ) foram considerados três cenários no cálculo da estimativa teórica conforme Tabela 16. No primeiro cenário foram utilizados os dados sugeridos pela USEPA (1991) e no segundo cenário os dados sugeridos por ESMAP (2004). Finalmente, para o terceiro cenário foram considerados maiores valores para  $k$  e  $L_0$ , considerando-se que os valores de precipitação média anual das cidades de Içara e Biguaçu, são maiores que 1000 mm e que os resíduos depositados nos aterros são altamente degradáveis. Os valores do cenário 3 foram baseados nas Tabelas 7 e 8 da seção 2.3.5.

**Tabela 16. Cenários e valores adotados para a estimativa teórica.**

Cenários	Valores	
	$k$ ( $\text{ano}^{-1}$ )	$L_0$ ( $\text{m}^3/\text{t}$ )
1 (USEPA, 1991)	0,04	100
2 (ESMAP, 2004)	0,06	170
3 (Características locais – ESMAP, 2004)	0,09	225

Os valores propostos para o terceiro cenário são justificáveis tendo em vista que, segundo dados repassados pela EPAGRI (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina), a precipitação média anual das cidades de Içara e Biguaçu são de 1576,7 mm e 1574,7 mm, respectivamente. Além disso, de acordo com a Tabela 2 da seção 2.1.2 com as proporções da composição gravimétrica dos resíduos sólidos, as cidades que

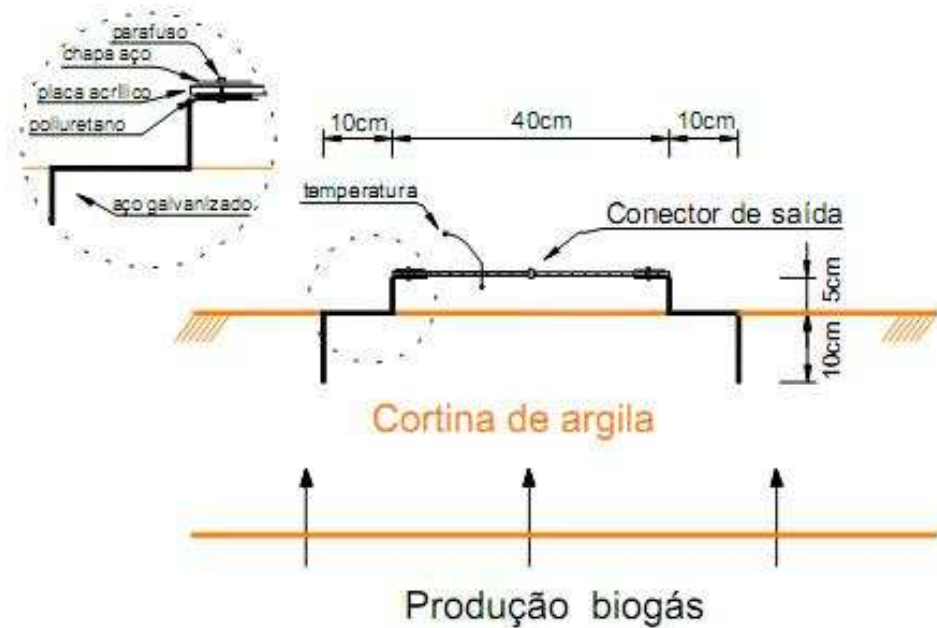
depositam seus resíduos no aterro sanitário de Içara (Criciúma, Içara e Nova Veneza) têm em média 66,4% de material altamente degradável, isso considerando apenas a fração de matéria orgânica, papel e papelão. A mesma tabela apresenta o valor de 60,6% para a cidade de Florianópolis que é a maior colaboradora dos resíduos recebidos no aterro sanitário de Tijuquinhas.

Com os valores de vazão de gás dos aterros obtidos a partir da caracterização dos drenos, verificou-se em qual dos cenários propostos coincidiu a emissão para o ano de 2008. No caso de nenhum dos cenários propostos coincidirem com o valor obtido em campo, foi obtido um quarto cenário a partir de diferentes valores  $k$  e  $L_0$ .

No aterro de Içara considerou-se que os drenos coletam 70% das emissões de metano. Para o aterro de Tijuquinhas, as emissões foram divididas nas linhas L1 (lixo recente) e L2 (lixo antigo). Segundo dados da empresa responsável, a L1 coleta, em extração ativa, aproximadamente 70% do biogás e a L2 cerca de 30% dos gases gerados, também em extração ativa.

### 3.4 ESTIMATIVA DA EMISSÃO DE GASES PELA CAMADA DE COBERTURA

Os ensaios para caracterização da camada de cobertura dos resíduos têm por objetivo avaliar o comportamento geotécnico da cobertura no que se refere à percolação, emissão e retenção do  $\text{CH}_4$ . Este levantamento é de grande importância para estimar a eficiência atual do sistema de coleta de gases. As estimativas de fluxo de gás nos aterros sanitários pela camada de cobertura foram obtidas com o uso de uma placa de fluxo estática confeccionada a partir do modelo utilizado por MACIEL (2003), com dimensões de área de base de  $0,16 \text{ m}^2$  ( $0,40 \text{ cm} \times 0,40 \text{ cm}$ ) e 8 L de volume (Figura 18). Para facilitar a cravação no solo e evitar a entrada de ar atmosférico conduzido pelo vento a base da placa tem um degrau de 10 cm na largura e na altura.



**Figura 18. Esquema da placa de fluxo.**

Fonte: Maciel (2003).

A placa desse estudo foi confeccionada em chapa de aço 1020 de 2 mm de espessura soldada pelo processo TIG (*Tungsten Inert Gas*). O visor foi feito com chapa de acrílico de 10 mm a qual foi furada e fixada com parafusos na estrutura de aço. Nessa placa de acrílico foram feitos dois furos para a fixação de engates rápidos de conexão de mangueiras de amostragem do gás. Também foi fixado na placa de acrílico um termopar tipo K para obtenção da temperatura do gás no interior da placa.

### 3.4.1 Cravação da placa de fluxo

A cravação da placa de fluxo na camada de cobertura é feita em uma vala escavada com as dimensões totais da placa mais uma folga de cerca de 5 cm para cada lado ( $70 \times 70 \text{ cm}^2$ ) com profundidade de aproximadamente 15 cm. Deve-se escavar com cuidado para não perturbar as características geotécnicas da área a ser investigada. Em seguida, a placa é pressionada verticalmente por meio do degrau para o cravamento no solo. Finalmente, recompõe-se a vala compactando manualmente o solo escavado. A um raio de aproximadamente 1,5 metros da cravação da placa cava-se o solo até a camada de resíduos. Mede-se a altura da camada de cobertura e tapa-se o buraco cavado, tomando-se o cuidado de instalar um tubo de PVC para monitorar a emissão de gases diretamente da massa de resíduos.

A Figura 19 apresenta seqüência da escavação para cravamento da placa de fluxo e o tubo de PVC aterrado.



**Figura 19. Seqüência para cravamento da placa de fluxo e o tubo de PVC.**

### 3.4.2 Leitura na placa de fluxo e no tubo de PVC

O ensaio inicia-se logo em seguida à cravação da placa de fluxo na camada de cobertura coletando-se os dados de concentração dos gases e temperaturas interna e externa. Optou-se por realizar as leituras de acordo com um determinado padrão de tempo, conforme a Tabela 17. As leituras foram realizadas a cada minuto nos primeiros 5 minutos, sendo em seguida a cada 5 minutos até completar uma hora de ensaio. Depois de uma hora de ensaio as medições foram realizadas a cada 10 minutos até que as concentrações se tornassem constantes, totalizando cerca de 2 horas. A Figura 20 ilustra a realização das leituras na placa de fluxo.

**Tabela 17. Intervalos de coleta de dados e parâmetros analisados.**

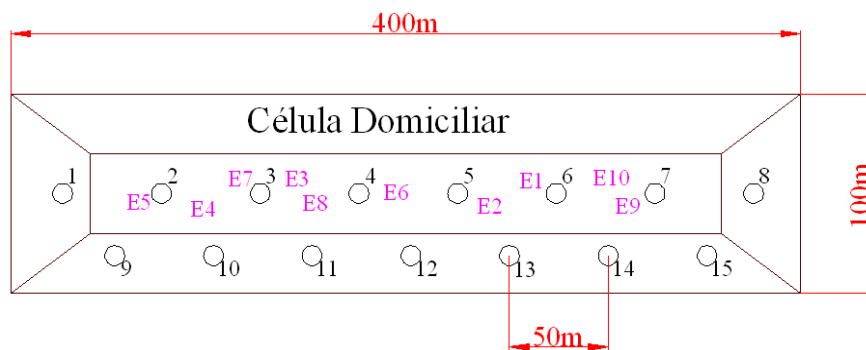
<b>Tempo de Ensaio (min)</b>	<b>Intervalo de Coleta de Dados</b>	<b>Parâmetros Analisados</b>
0 – 5	1 minuto	Concentração dos gases (CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> ), temperaturas interna e externa.
5 – 60	5 minutos	
60 – 120	10 minutos	

As leituras realizadas no tubo de PVC foram apenas das concentrações dos gases após a estabilização das leituras. Procurou-se realizar os ensaios em toda a área da célula do aterro, evitando pontos próximos aos taludes para evitar possíveis influências de vento e erosão do solo, com solo irregular e com grandes fissuras.

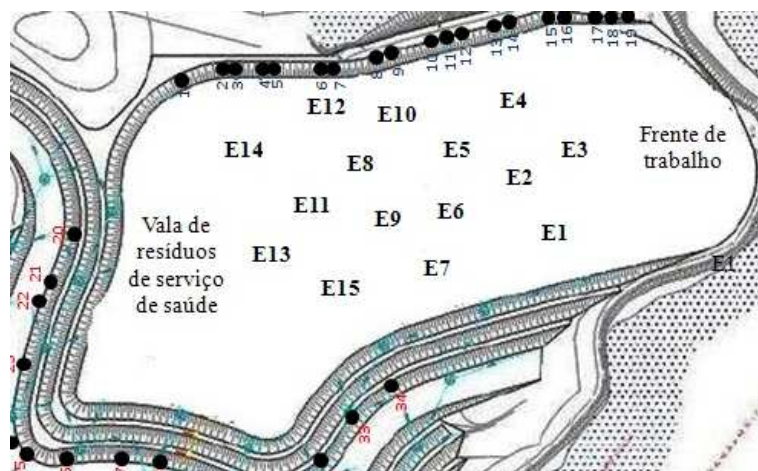


**Figura 20.** Leituras na placa de fluxo.

No aterro sanitário de Içara foram realizados 10 ensaios de placa de fluxo, no período de 20/05/2008 a 28/08/2008, e os locais do ensaio podem ser verificados na Figura 21. Já no aterro sanitário de Tijuquinhas foram realizados 15 ensaios no período de 18/09/2008 a 12/12/2008, e os locais dos ensaios podem ser verificados na Figura 22.



**Figura 21.** Ensaios de placa de fluxo no aterro de Içara.



**Figura 22.** Ensaios de placa de fluxo no aterro de Tijuquinhas.

### 3.4.3 Cálculo do fluxo dos gases

Os fluxos e as massas de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> foram calculados através das Equações 11, 12 e 13 apresentadas na seção 2.3.6. O fluxo foi calculado na parte linear da curva de variação das concentrações até cerca de 30 minutos de ensaio baseado nos estudos realizados pelos pesquisadores Maciel (2003), Tanaka, Matsuto e Lee (1997).

### 3.4.4 Caracterização do solo de cobertura

A fim de verificar a influência dos parâmetros do solo de cobertura com o fluxo de metano foram realizados alguns ensaios do solo, em campo, nos mesmos locais e mesmos dias dos ensaios, tais como: umidade do solo em campo e densidade do solo em campo.

Os ensaios realizados em laboratório tais como análise granulométrica, limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), e compactação *Proctor Normal* foram realizados uma única vez para cada aterro. Adotou-se este procedimento, pois os materiais utilizados como camada de cobertura nos aterros de Içara e Tijuquinhas provem de uma única jazida, considerando-se dessa forma os dois solos homogêneos. Para as análises de laboratório coletou-se aproximadamente 15 kg de solo no aterro de Içara no dia 17/06/2008 e a mesma quantidade foi coletada no aterro de Tijuquinhas no dia 07/11/2008. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da UFSC.

A Tabela 18 apresenta os ensaios e as normas utilizadas na caracterização do solo.

**Tabela 18. Parâmetros de caracterização da camada de cobertura.**

<b>Parâmetros</b>	<b>Metodologia</b>
Densidade do solo em campo	NBR 7185/86
Umidade do solo em campo	NBR 6457/86
Análise Granulométrica	NBR 7181/84
Limite de Liquidez (LL)	NBR 6459/84
Limite de Plasticidade (LP)	NBR 7180/84
Compactação <i>Proctor Normal</i>	NBR 7182/86

### 3.5 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

Dados climáticos de pluviometria, pressão atmosférica, umidade relativa e temperatura média de estações experimentais próximas aos locais dos estudos foram obtidos junto à Epagri/Inmet – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina S.A./Instituto Nacional de Meteorologia. A estação mais próxima do aterro de Içara é a Estação Meteorológica de Urussanga e a mais próxima ao aterro de Tijuquinhas é a Estação Meteorológica de São José. No aterro sanitário de Içara existe uma estação meteorologia com um pluviômetro instalado, portanto, optou-se por utilizar os dados de chuva do local.

Os dados climáticos foram utilizados para verificar a influência dos mesmos com os valores de vazão e concentração obtidos nos drenos e com o fluxo de metano pela camada de cobertura. Além disso, os valores de pressão atmosférica foram utilizados na correção das vazões de biogás dos drenos.

### 3.6 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Os resultados foram analisados através de análise descritiva básica, tais como médias, desvios padrão, valores mínimos e máximos.

Na estimativa das vazões dos aterros, através dos dados obtidos em campo, foi utilizado o teste *t* de *Student*. Calcularam-se a partir deste teste os intervalos inferiores e superiores das médias obtidas com 99% de confiança.

Para verificar a influência entre as variáveis obtidas, e entre estas com as condições climáticas utilizou-se a correlação de *Spearman*. Esta correlação foi escolhida, pois a mesma é não paramétrica e não necessita que a relação entre as variáveis seja linear. No cálculo da correlação utilizou-se nível de significância de 95% ( $\alpha = 0,05$ ).

Nas correlações dos resultados obtidos com as condições climáticas, foram consideradas: temperatura ambiente média diária, umidade relativa, pressão atmosférica do horário mais próximo ao ensaio, e para os valores de chuva foi adotado o valor acumulado de uma semana anterior ao ensaio.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos dois aterros deste estudo e as discussões sobre os mesmos. A seção 4.1 contém os resultados referentes ao aterro de Içara e a seção 4.2 ao aterro de Tijuquinhas. Os resultados apresentados para ambos os aterros são da caracterização do biogás nos drenos (vazão e composição), curva de geração de biogás teórica para diferentes cenários e os fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> pela camada de cobertura.

### 4.1 ATERRO SANITÁRIO DE IÇARA

#### 4.1.1 Caracterização do biogás gerado nos drenos

As medidas descritivas das vazões de biogás e de metano nos drenos de 1 a 12 (Figura 11 – seção 3.1.1) são apresentadas a seguir (Tabelas 19 e 20). Nas tabelas encontram-se as médias, desvios padrão e valores máximos e mínimos para cada dreno. Os cálculos de vazão total foram obtidos com a soma das vazões de cada dreno por observação. Os valores de vazão de metano foram obtidos pelo produto entre as concentrações de metano e os valores de vazão de biogás para cada dreno através da média ponderada. Os valores obtidos em cada dreno por observação encontram-se no Apêndice A.

Não foi possível obter as vazões dos drenos 13,14 e 15 (Figura 11 – seção 3.1.2) porque os mesmos possuem um formato de queimador diferente dos demais, não sendo possível a adaptação do bocal ou a obtenção de um fluxo constante de biogás. Mesmo assim, como estes drenos estão na mesma profundidade de resíduos que os drenos laterais que apresentaram menores valores de vazão em relação aos drenos do centro do aterro, optou-se por desprezá-los no cálculo da vazão total.

Os drenos centrais 2, 3, 4, 5, 6 e 7 representaram aproximadamente 74% da vazão média total de biogás e 85% da vazão média total de metano. Destes, o dreno 3 foi o que teve a menor contribuição, com vazão média de biogás semelhante aos drenos laterais 10 e 11.

Entretanto, por apresentar maior concentração de metano, a vazão média de metano do dreno 3 foi maior que a dos drenos laterais.

**Tabela 19. Vazão Biogás (Nm<sup>3</sup>/h).**

Drenos	n	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
1	8	18,6	9,8	3,3	30,8
2	8	45,2	13,4	15,0	57,4
3	8	25,3	3,9	17,6	30,2
4	8	74,4	11,5	54,9	89,6
5	8	63,3	7,5	51,7	71,9
6	8	75,3	16,3	47,8	99,6
7	8	68,3	7,0	56,7	79,3
8	8	16,7	4,8	9,3	21,9
9	8	13,0	10,6	0	26,7
10	8	27,7	4,3	21,2	33,3
11	8	28,4	2,3	25,3	31,6
12	8	21,7	3,4	16,8	27,2
Vazão Total	8	478,0	42,4	393,5	522,5

Os drenos laterais 1, 8, 9, 10, 11 e 12 foram os que apresentaram menores vazões médias de metano. Devido a sua alta concentração em metano, o dreno 12 apresentou maiores valores de vazão média de metano que os drenos 10 e 11, contrariamente às vazões médias de biogás.

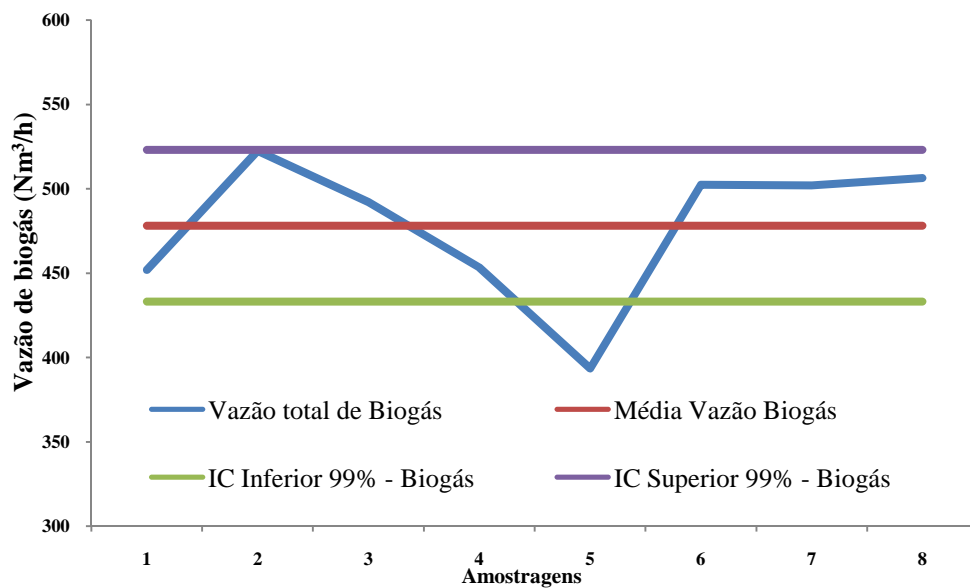
**Tabela 20. Vazão Metano (Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/h).**

Drenos	n	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
1	8	0,7	0,5	0,1	1,8
2	8	20,2	7,2	5,1	26,4
3	8	15,2	2,7	10,0	19,6
4	8	36,3	6,5	25,8	47,2
5	8	29,6	4,1	23,3	33,8
6	8	40,4	8,3	26,8	51,6
7	8	36,4	5,7	28,3	47,1
8	8	8,8	3,2	3,4	12,0
9	8	0,4	0,4	0	1,3
10	8	6,0	1,4	3,2	7,8
11	8	7,0	1,5	4,6	8,7
12	8	9,2	2,5	5,4	12,0
Vazão Total	8	210,2	20,8	177,2	238,6

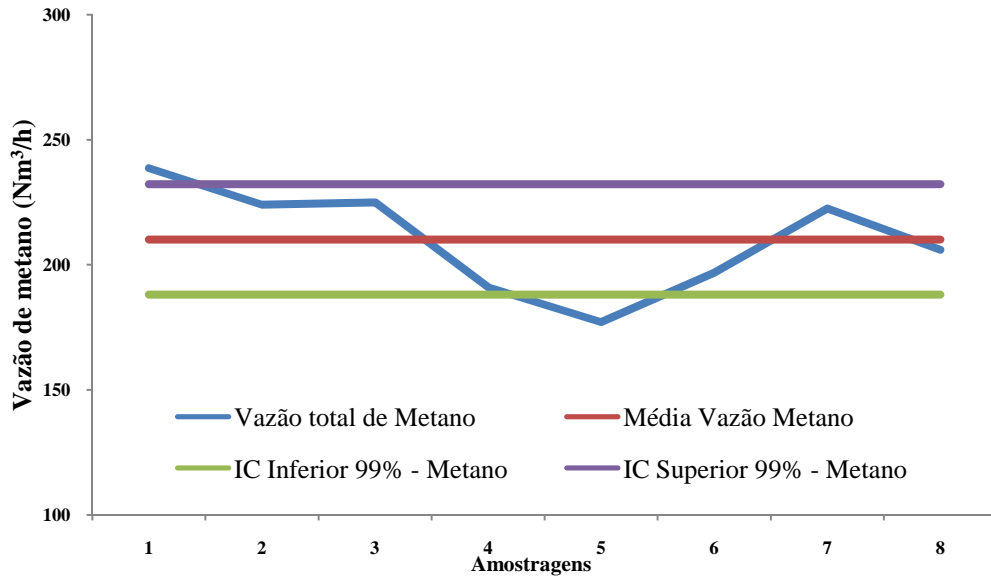
A maioria dos drenos tiveram baixos desvios padrão, principalmente nos drenos com maiores vazões. As vazões totais, por exemplo, que representam a soma de todos os drenos e poderiam apresentar altos valores, apresentaram 9% e 10% de coeficiente de variação (razão entre o desvio e a média) para as médias de biogás e metano, respectivamente.

A partir das 8 observações realizadas no aterro estimou-se a produção total de biogás e de metano. Tendo em vista que o número de amostragens é pequeno ( $< 50$ ), utilizou-se para os cálculos a distribuição  $t$  de *Student*, que se aproxima de uma distribuição normal à medida que o número de observações cresce (BARBETTA; REIS; BORNIA, 2008).

As vazões totais de biogás e de metano obtidas nos 8 ensaios, seus valores médios e os seus intervalos inferior e superior com 99% de confiança são apresentados a seguir (Figuras 23 e 24). Para as amostragens realizadas, a média da extração de biogás do aterro de Içara foi de  $478,0 \text{ Nm}^3/\text{h}$  com variação de  $44,9 \text{ Nm}^3/\text{h}$ . Já para a vazão de metano, obteve-se o valor médio de  $210,2 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$  com variação de  $22,0 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$ .



**Figura 23. Vazões médias de biogás e intervalos de confiança 99%.**



**Figura 24. Vazões médias de metano e intervalos de confiança 99%.**

A partir das estimativas das médias das vazões de biogás, e considerando-se que estão depositados no aterro 219.418 t de resíduos e eficiência de coleta de 70%, estima-se a taxa de geração atual de biogás do aterro entre 24,7 Nm<sup>3</sup>/t.ano e 29,8 Nm<sup>3</sup>/t.ano. Esses valores são superiores aos obtidos nas medições dos drenos de aterros sanitários dos Estados Unidos (1 a 14 m<sup>3</sup>/t.ano) apresentados por Castilhos Jr. et al. (2003). No Brasil, no aterro Delta localizado na cidade de Campinas, Ensinas (2003) encontrou uma taxa de geração de 5,6 Nm<sup>3</sup>/t.ano para mais de 2,5 milhões de toneladas de resíduos depositados desde o ano de 1992 até a data de sua pesquisa.

Na Tabela 21 podem ser observadas as concentrações médias ponderadas, em relação à vazão, com seus respectivos desvios padrão e valores máximos e mínimos dos gases analisados nas 8 amostragens dos drenos do aterro sanitário de Içara. Nesses cálculos foram desprezados os valores dos drenos 1 e 9 que tiveram concentrações semelhantes ao do ar atmosférico. Esse fato pode ser atribuído à baixa vazão dos mesmos e de uma potencial diluição no momento das leituras de concentração. Os valores médios de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> estão dentro dos encontrados na literatura, apresentados na Tabela 4 da seção 2.3.2. No geral, as concentrações de H<sub>2</sub>S foram muito baixas em todos os drenos, apresentando alto desvio padrão em relação ao valor médio.

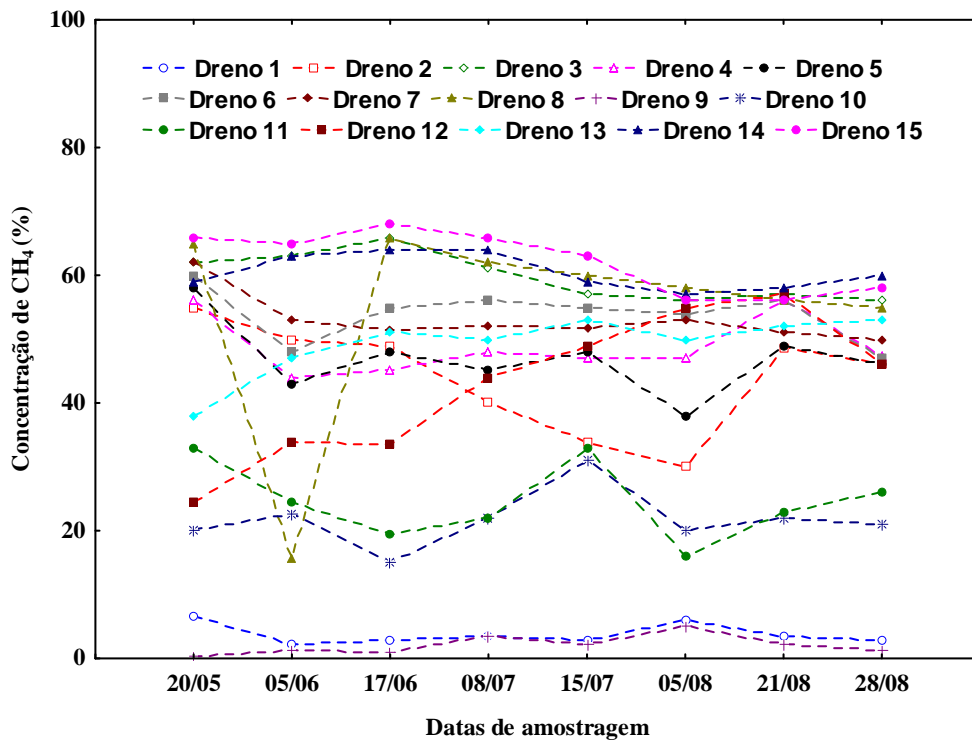
Os valores de concentração obtidos por dreno nas amostragens encontram-se no Apêndice A.

**Tabela 21. Concentração média dos gases.**

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

As concentrações médias de CH<sub>4</sub> foram maiores que as de CO<sub>2</sub> na maioria dos drenos, com exceção dos drenos 1 e 9. Os drenos centrais (2 a 7) e os laterais 8, e 12 tiveram altas concentrações médias de CH<sub>4</sub>, com valores médios máximos de 59,8% no dreno 3 e mínimos de 42,9% no dreno 12. Estes drenos também tiveram altos valores médios de CO<sub>2</sub>, sendo o máximo de 43,1% no dreno 5 e o mínimo 35,0% no dreno 2. Para o O<sub>2</sub>, os mesmos drenos tiveram médias máximas de 5,9% no dreno 2 e mínimas de 0,5 no dreno 3.

As Figuras 25 a 28 apresentam as variações das concentrações de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, nos drenos de biogás, podendo-se verificar como se comportaram as variações dos valores ao longo do tempo.

**Figura 25. Variações nas concentrações de CH<sub>4</sub>.**

Na Figura 25 nota-se que as concentrações ao longo do tempo tiveram pouca variação, com exceção do dreno 8 que apresentou uma grande queda na data de 05/06, voltando a um

valor constante a partir da observação seguinte. Quanto ao comportamento do  $\text{CO}_2$ , observa-se na Figura 26 que a maioria dos drenos teve variação semelhante ao de  $\text{CH}_4$ .

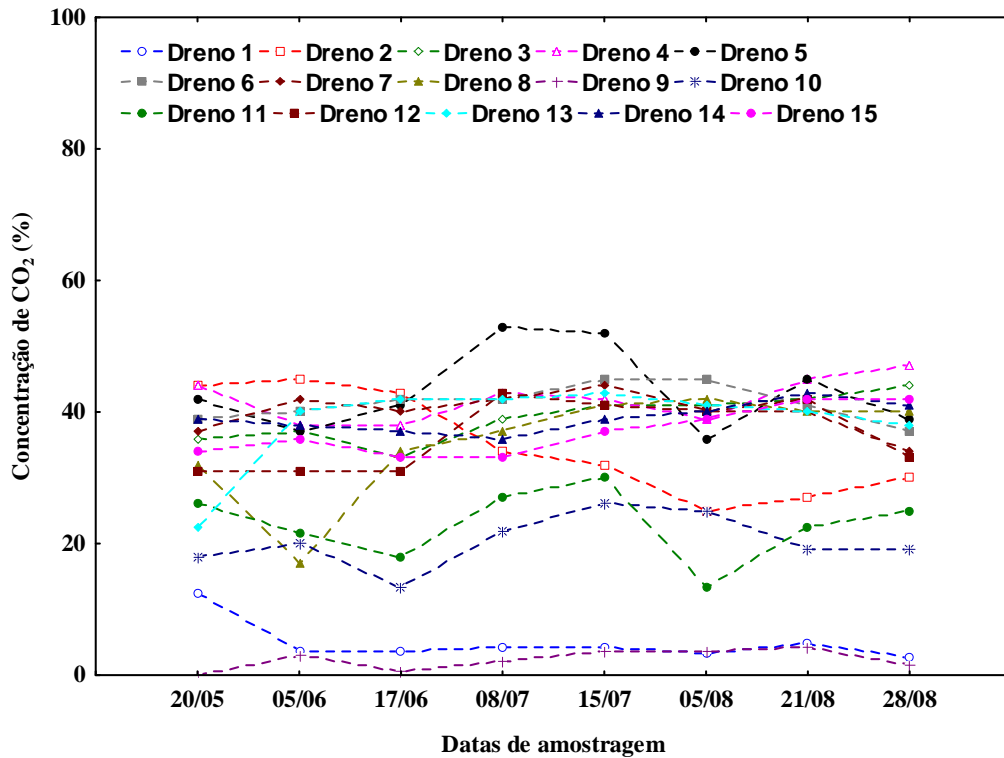


Figura 26. Variações nas concentrações de  $\text{CO}_2$ .

Na Figura 27 verifica-se um pico no dreno 8 coincidindo com as quedas de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  apontadas anteriormente. Na Figura 28 observa-se um pico na concentração de  $\text{H}_2\text{S}$  na primeira observação do dreno 2, e no dia 15/07 verifica-se a ocorrência de dois picos nos drenos 6 e 5. Nesse mesmo dia pode-se verificar nas Figuras 23 e 24 (amostragem 5), apresentadas anteriormente, que houveram quedas na vazão total de biogás e metano.

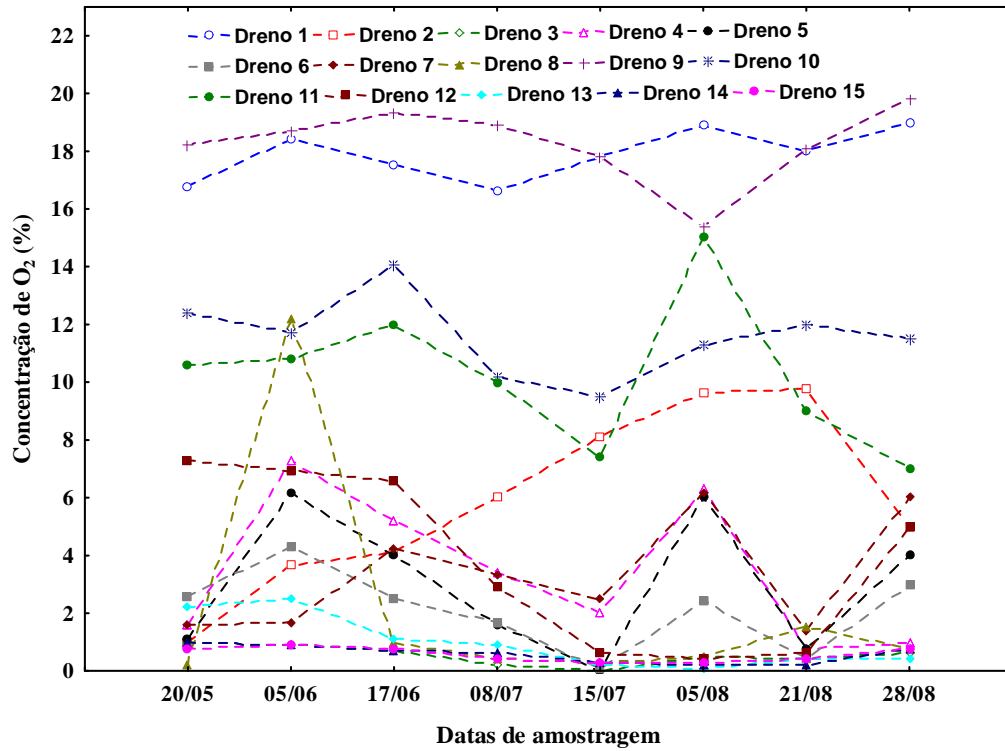


Figura 27. Variações nas concentrações de  $O_2$ .

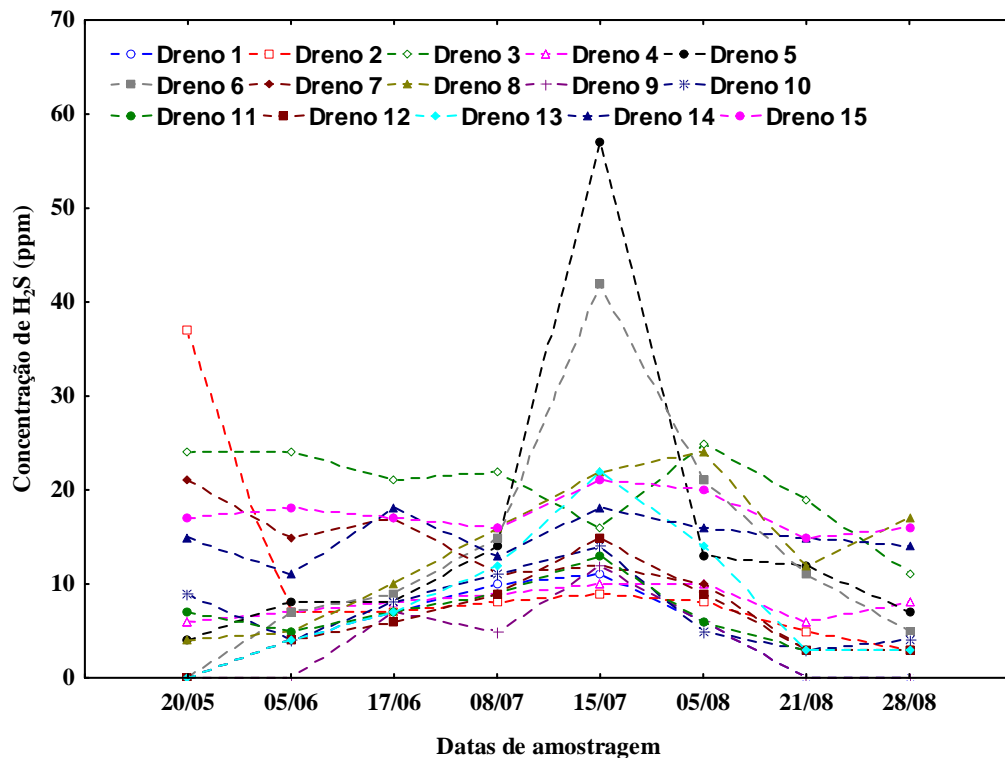


Figura 28. Variações nas concentrações de  $H_2S$ .

A partir dos dados apresentados (vazões e concentrações) e em posse dos valores das condições climáticas como pluviometria, temperatura ambiente média, pressão atmosférica e

umidade relativa, verificou-se a correlação de Spearman entre as variáveis para todos os drenos. Na Tabela 22 pode ser verificada a matriz de correlação para as variáveis de todos os drenos, com os valores significativos ( $p < 0,05$ ) destacados em vermelho.

**Tabela 22. Matriz de correlação entre as variáveis.**

Variáveis	Vazão biogás	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
Vazão biogás	1,00				
CH <sub>4</sub>	<b>0,31</b>	1,00			
CO <sub>2</sub>	<b>0,52</b>	<b>0,80</b>	1,00		
O <sub>2</sub>	<b>-0,25</b>	<b>-0,93</b>	<b>-0,87</b>	1,00	
H <sub>2</sub> S	0,13	<b>0,50</b>	<b>0,55</b>	<b>-0,58</b>	1,00
Temp. gás	<b>0,79</b>	<b>0,32</b>	<b>0,45</b>	<b>-0,27</b>	0,09
Temp. ambiente média	-0,01	0,12	0,06	-0,13	<b>-0,28</b>
Pluviometria	0,12	-0,07	-0,04	0,08	-0,08
Umidade relativa	0,03	0,07	0,14	-0,11	0,21
Pressão atmosférica	-0,10	-0,05	0,09	-0,06	<b>0,46</b>

A concentração de H<sub>2</sub>S foi a única variável a apresentar correlação significativa com as condições climáticas: 0,46 com a pressão atmosférica (correlação positiva moderada) e -0,28 com a temperatura ambiente (correlação negativa fraca). A vazão de biogás teve correlação positiva forte com a temperatura do gás (0,79), fato esse que pode ser justificado pela correção da vazão com o valor de temperatura. A vazão total teve ainda, correlações mais fracas com as concentrações de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e O<sub>2</sub> (0,52, 0,31 e -0,25, respectivamente). As concentrações tiveram correlações fortes entre elas, destacando-se o CH<sub>4</sub> e o CO<sub>2</sub> com O<sub>2</sub> com -0,93 e -0,87, respectivamente.

Não houve correlação significativa entre a vazão do biogás e a concentração de H<sub>2</sub>S, não encontrando justificativa entre a queda da produção do gás com os picos da concentração de H<sub>2</sub>S apresentados anteriormente (Figuras 23, 24 e 28).



### 4.1.2 Estimativa teórica da geração de metano

Na Figura 29 podem ser visualizadas as curvas de geração de metano relativas aos 3 cenários propostos (Tabela 16 – seção 3.3) e o valor real obtido em campo acrescido de 30% ( $2,63 \times 10^6 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{ano}$ ), pois estima-se a 70% a eficiência de captação dos drenos. Observa-se que a vazão real fica muito próxima ao cenário 3, com os valores sugeridos para as características de pluviometria local e composição dos resíduos.

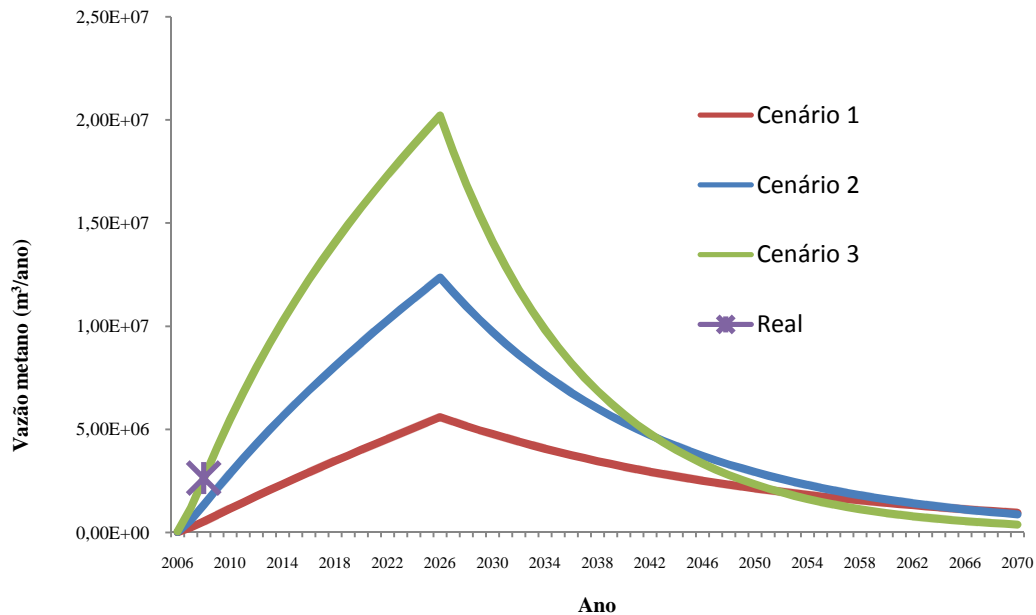


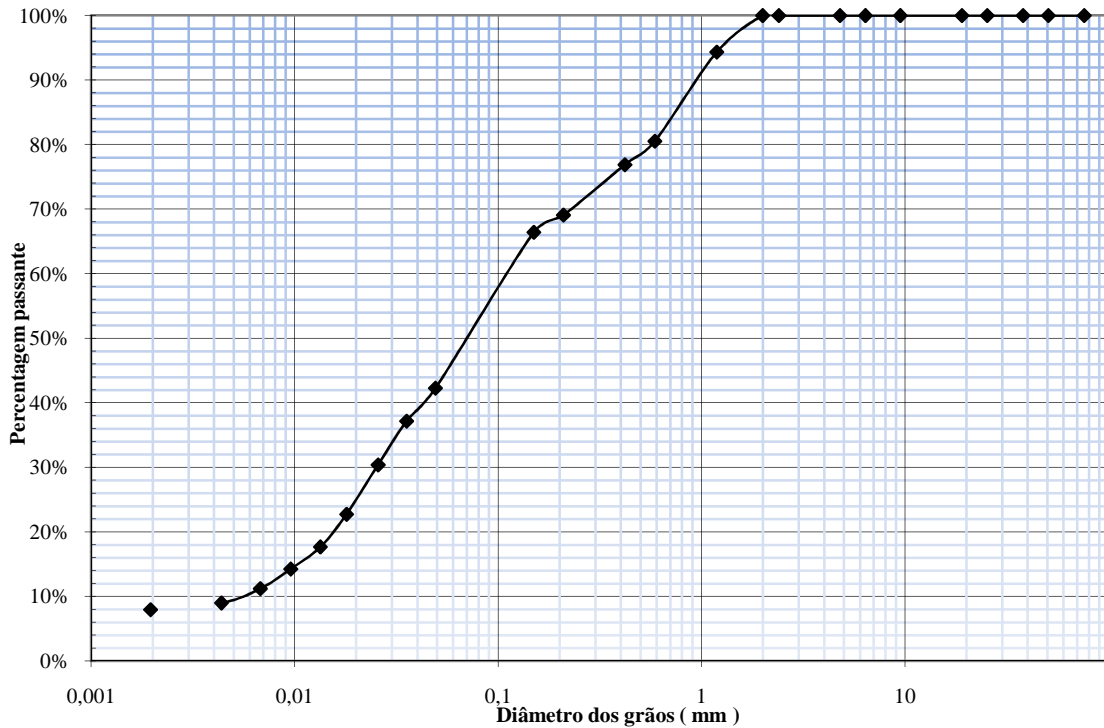
Figura 29. Curvas de geração de metano para os cenários propostos.

### 4.1.3 Emissões de biogás pela camada de cobertura

#### 4.1.3.1 Caracterização da camada de cobertura

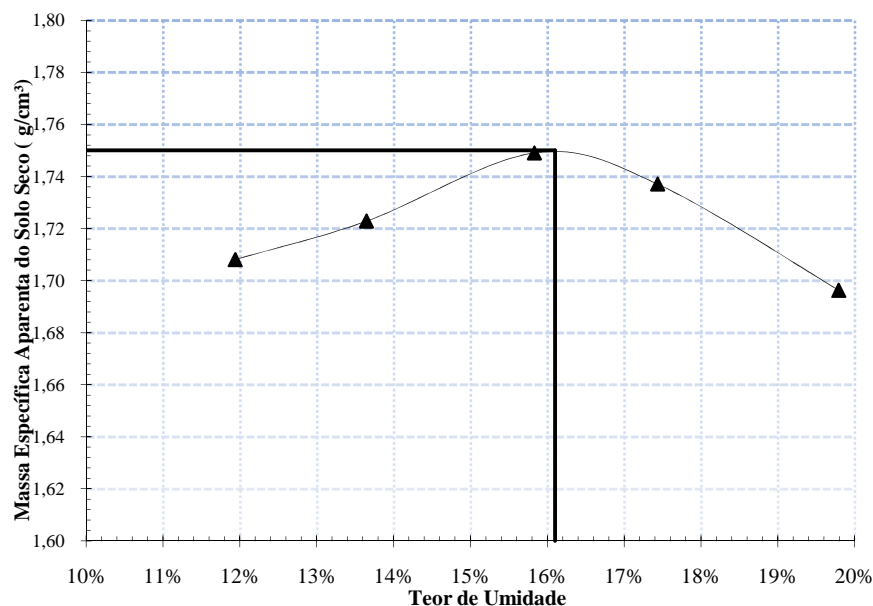
A Figura 30 apresenta a curva granulométrica do solo utilizado para camada de cobertura no aterro sanitário de Içara. A composição do solo é de 7,94% de argila, 34,32% de silte, 26,81% de areia fina, 11,45% de areia média, 19,48% de areia grossa e não possui pedregulho. Os limites de Atterberg foram de 36% para o limite de liquidez (LL), 25% para o limite de plasticidade (LP), resultado em 11% para o índice de plasticidade (IP).

Verifica-se que este solo é classificado como areno-siltoso com pouco de argila, bem graduado e com baixa plasticidade de acordo com o sistema unificado de classificação dos solos (SUCS).



**Figura 30.** Curva granulométrica do solo (camada de cobertura) do aterro de Içara.

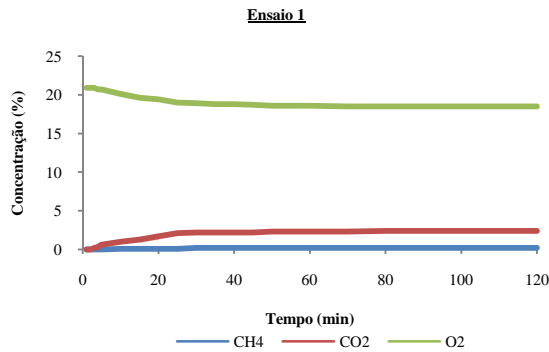
No ensaio de compactação *Proctor Normal*, obteve-se a curva de compactação em que podem ser determinados os valores de densidade específica máxima do solo seco e umidade ótima. A partir da curva de compactação (Figura 31) do solo em estudo determinou-se a densidade máxima do solo seco de  $1,75 \text{ g/cm}^3$  e a umidade ótima de 16,1%. Nessas condições, o índice de vazios é o menor possível dificultando o transporte de substâncias, como a emissão de gases.



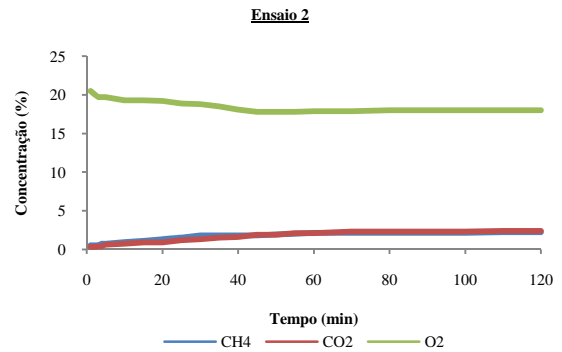
**Figura 31.** Curva de compactação do solo (camada de cobertura) do aterro de Içara.

#### 4.1.3.2 Fluxo de biogás pela camada de cobertura

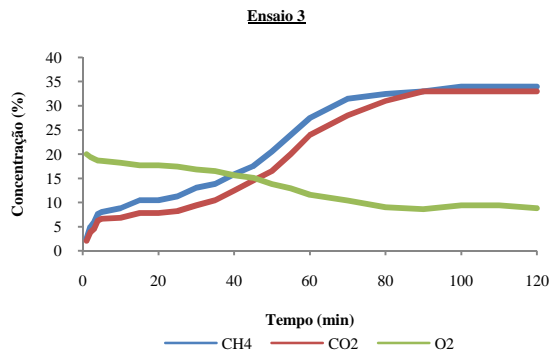
As variações no tempo das concentrações de metano, dióxido de carbono e oxigênio, obtidas nos ensaios E1 a E10, podem ser observadas nas Figuras 32 a 41. Observa-se nos gráficos apresentados que na maioria dos ensaios as variações das concentrações dos gases foram baixas. Os ensaios E3, E4 e E8 que apresentaram as maiores variações estão no raio do dreno 3 (Figura 42), apontando uma maior emissão de metano ao redor deste dreno.



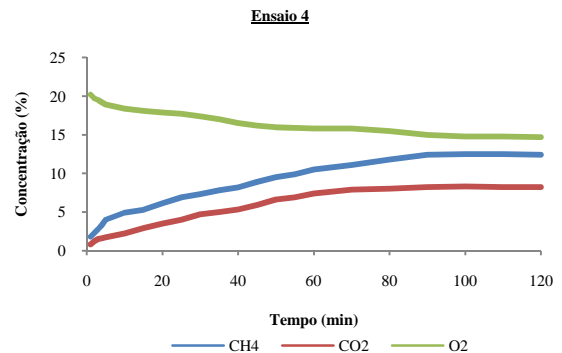
**Figura 32. Ensaio E1 - variação das concentrações no tempo.**



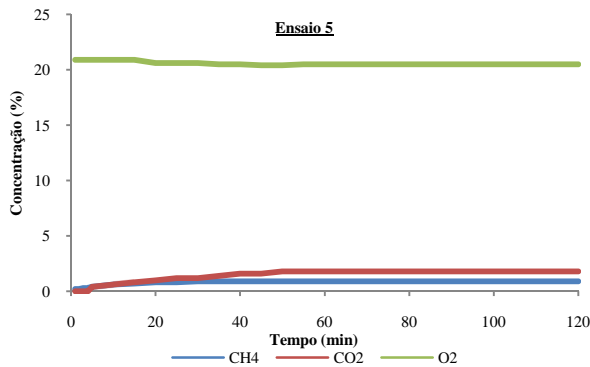
**Figura 33. Ensaio E2 - variação das concentrações no tempo.**



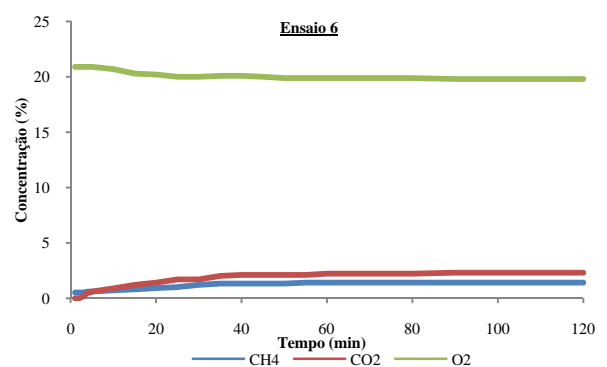
**Figura 34. Ensaio E3 - variação das concentrações no tempo.**



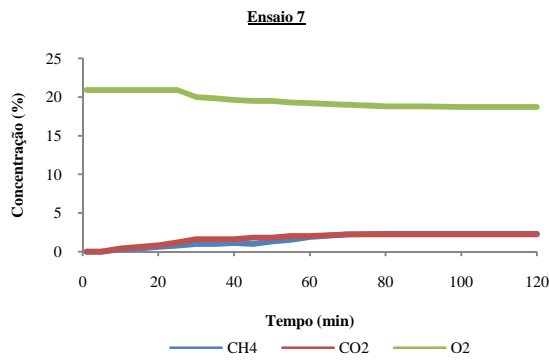
**Figura 35. Ensaio E4 - variação das concentrações no tempo.**



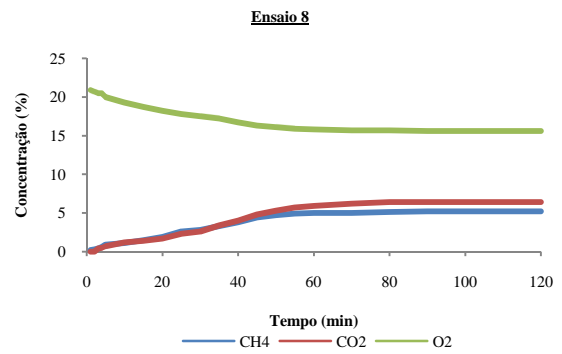
**Figura 36. Ensaio E5 - variação das concentrações no tempo.**



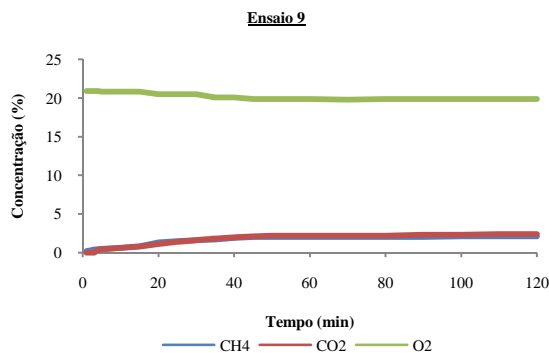
**Figura 37. Ensaio E6 - variação das concentrações no tempo.**



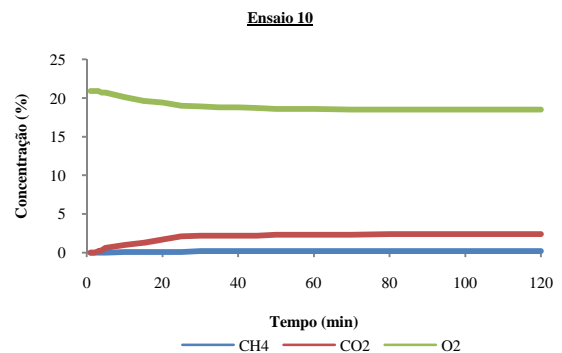
**Figura 38. Ensaio E7 - variação das concentrações no tempo.**



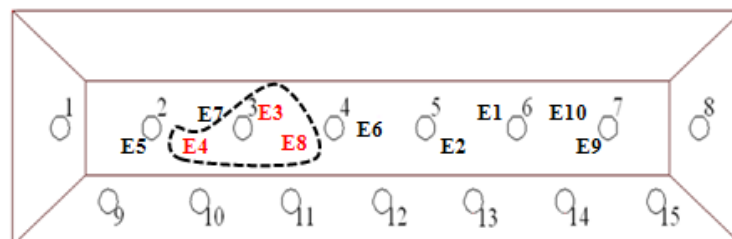
**Figura 39. Ensaio E8 - variação das concentrações no tempo.**



**Figura 40. Ensaio E9 - variação das concentrações no tempo.**

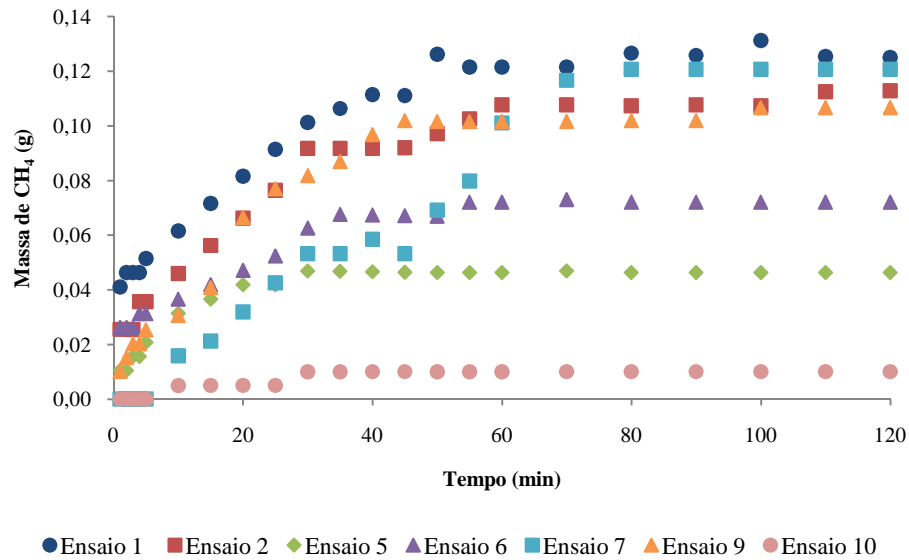


**Figura 41. Ensaio E10 - variação das concentrações no tempo.**

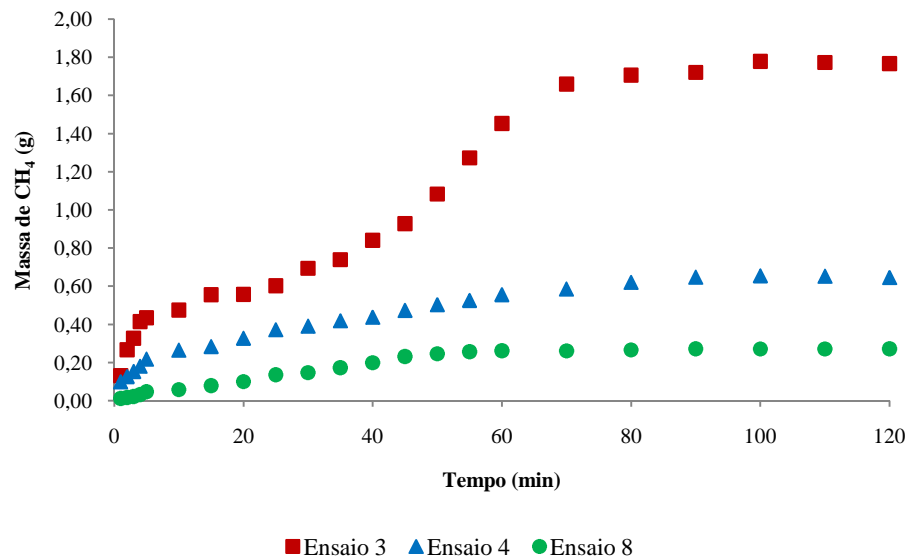


**Figura 42. Locais dos ensaios e pontos de maior variação em destaque.**

As variações da massa de  $\text{CH}_4$  no interior da placa de fluxo encontram-se nas Figuras 43 e 44. Para melhor visualização das curvas, as mesmas foram separadas em função da quantidade final de  $\text{CH}_4$  na placa. Os ensaios E1, E2, E5, E6, E7, E9 e E10 obtiveram quantidades finais de  $\text{CH}_4$  na placa menores que 0,2 g, já os ensaios E3, E4 e E8 obtiveram valores finais acima de 0,2 g chegando a cerca de 1,8 g para o E3.

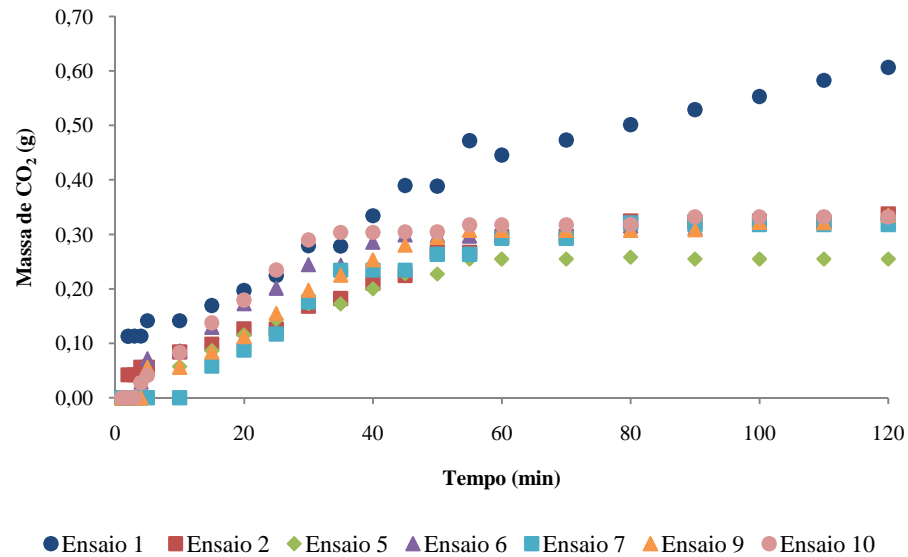


**Figura 43. Variação da massa de CH<sub>4</sub> no tempo de ensaio (<0,2 g).**

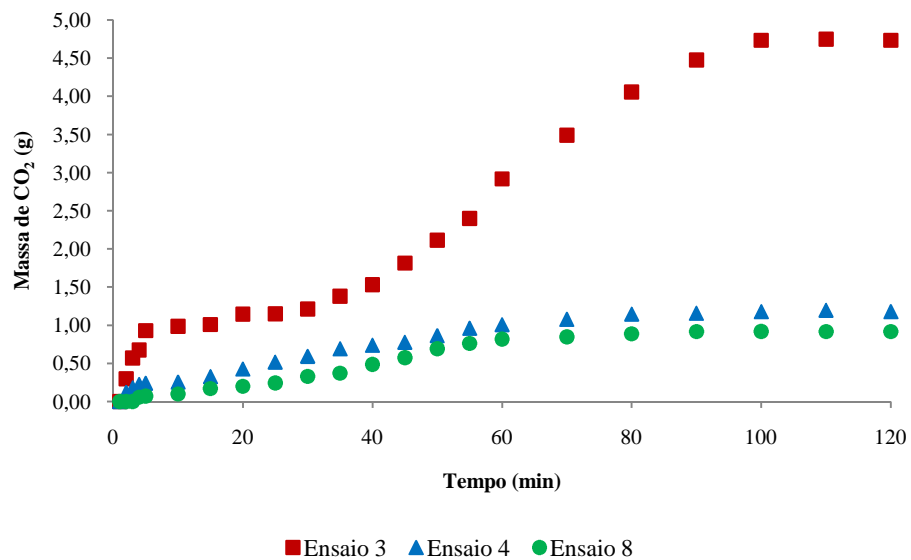


**Figura 44. Variação da massa de CH<sub>4</sub> no tempo de ensaio (>0,2 g).**

As variações da massa de CO<sub>2</sub> no interior da placa de fluxo encontram-se nas Figuras 45 e 46. Para melhor visualização das curvas, as mesmas também foram separadas em função da quantidade final de CO<sub>2</sub> na placa. Os ensaios E1, E2, E5, E6, E7, E9 e E10 obtiveram quantidades finais de CO<sub>2</sub> na placa menores que 0,7 g, já os ensaios E3, E4 e E8 obtiveram valores finais acima de 0,7 g chegando a cerca de 4,7 g para o E3.

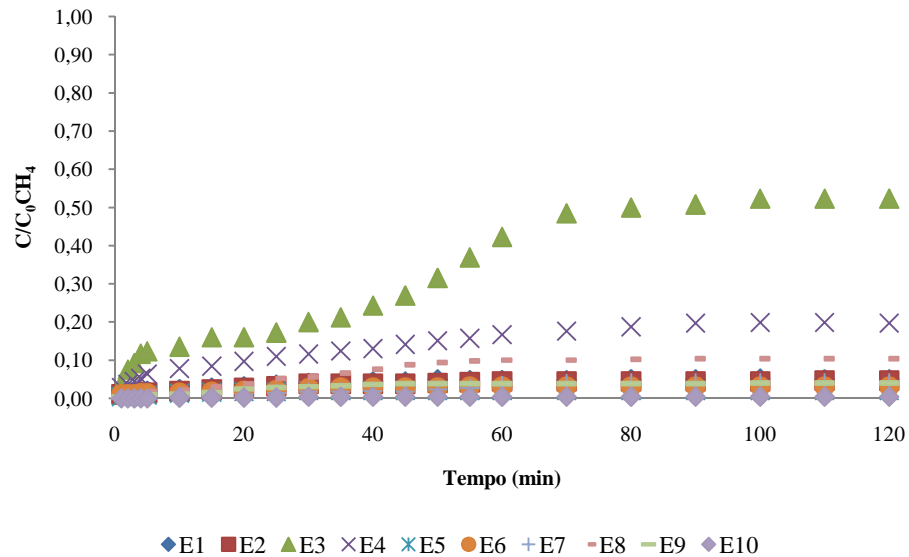


**Figura 45. Variação da massa de CO<sub>2</sub> no tempo de ensaio (<0,7 g).**



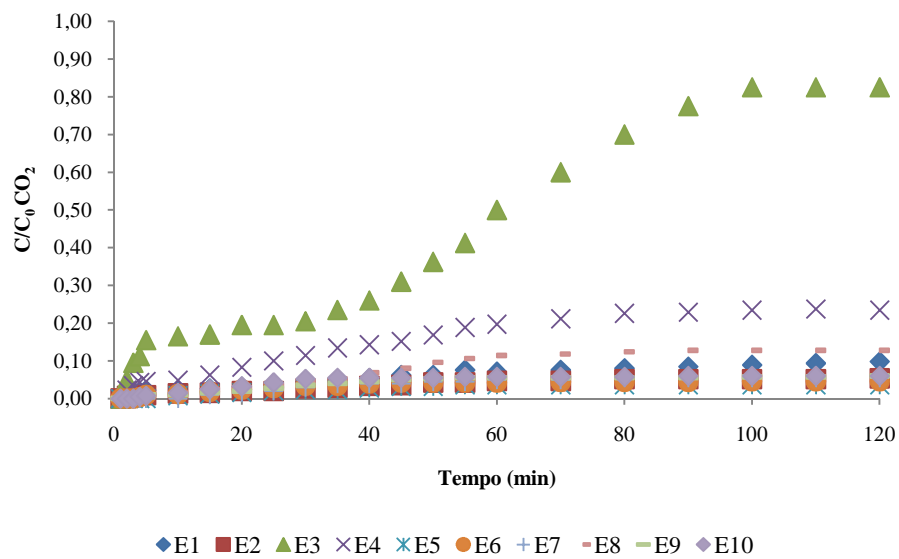
**Figura 46. Variação da massa de CO<sub>2</sub> no tempo de ensaio (>0,7 g).**

A retenção de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> pela camada de cobertura foi obtida através da relação da concentração do gás obtida no ensaio da placa de fluxo (C) com a concentração obtida direto da massa de resíduos (C<sub>0</sub>). Conforme pode-se verificar na Figura 47, a camada de cobertura do aterro deste estudo apresentou elevados valores de retenção de metano obtendo valores acima de 90% para 8 dos 10 ensaios realizados, com exceção dos ensaios E3 (48%) e E4 (80%).



**Figura 47. Relação  $C/C_0$  do  $\text{CH}_4$  durante os ensaios.**

Na Figura 48, como já observado para o  $\text{CH}_4$ , verifica-se altas retenções de  $\text{CO}_2$ , com valores acima de 90% para 7 dos 10 ensaios realizados, com exceção dos ensaios E3 (18%), E4 (77%) e E8 (87%).



**Figura 48. Relação  $C/C_0$  do  $\text{CO}_2$  durante os ensaios.**

A Tabela 23 apresenta a síntese dos resultados de fluxo, bem como as características da camada de cobertura nos locais de ensaio, tais como espessura da camada de cobertura, densidade do solo em campo ( $\gamma_{\text{campo}}$ ) e umidade do solo em campo ( $h_{\text{campo}}$ ).

**Tabela 23. Resultados dos ensaios.**

Ensaio	Espessura da camada (m)	$\gamma_{\text{campo}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$h_{\text{campo}}$ (%)	Fluxo CH <sub>4</sub> (10 <sup>-4</sup> g/m <sup>2</sup> .s)	Quantidade final de CH <sub>4</sub> na placa (g)	Fluxo CO <sub>2</sub> (10 <sup>-4</sup> g/m <sup>2</sup> .s)	Quantidade final de CO <sub>2</sub> na placa (g)
E1	0,33	13,40	11,20	2,16	0,12	5,95	0,60
E2	0,37	13,36	10,80	2,38	0,11	5,03	0,34
E3	0,54	15,92	12,50	20,22	1,77	38,79	4,71
E4	0,37	13,22	14,23	10,47	0,64	20,47	1,17
E5	0,35	16,25	16,20	1,31	0,05	6,18	0,25
E6	0,40	15,84	16,00	1,30	0,07	8,75	0,33
E7	0,49	14,32	18,30	1,91	0,12	8,41	0,32
E8	0,42	13,15	15,00	4,87	0,27	13,39	0,92
E9	0,31	13,52	19,60	2,57	0,11	8,08	0,34
E10	0,35	14,35	21,20	0,36	0,01	10,89	0,33

Nesta tabela observa-se que o E3 obteve o maior fluxo de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> mesmo apresentando a maior espessura de camada de cobertura. Como dito anteriormente, verificou-se que os ensaios com maior emissão dos gases foram ao redor do 3, e na caracterização do biogás apresentado no item 3.1.1 este dreno foi o que apresentou menor vazão entre os drenos centrais do aterro. Como durante os ensaios não foram encontradas fissuras na camada de cobertura que pudessem ter comprometido o resultado dos ensaios, sugere-se uma investigação deste dreno, uma vez que o mesmo pode estar obstruído.

Os fluxos de CH<sub>4</sub> estiveram entre 0,36 x 10<sup>-4</sup> g/m<sup>2</sup>.s (Ensaio 10) e 20,22 x 10<sup>-4</sup> g/m<sup>2</sup>.s (Ensaio 3) e os de CO<sub>2</sub> entre 5,03 x 10<sup>-4</sup> g/m<sup>2</sup>.s (Ensaio 2) e 38,79 x 10<sup>-4</sup> g/m<sup>2</sup>.s (Ensaio 3). Os valores de fluxo de CH<sub>4</sub> corresponderam aos encontrados na literatura para diferentes autores, que obtiveram valores entre 0,14 g/m<sup>2</sup>.dia a 1.384 g/m<sup>2</sup>.dia para ensaios com placa de fluxo estática (MACIEL, 2003; CHRISTOPHERSEN; POULSEN; KJELDSEN, 2001; COSSU et al.,1997; TANAKA; MATSUTO; LEE, 1997). Christophersen, Poulsen e Kjeldsen (2001) encontraram em seus experimentos fluxos de até 90 g/m<sup>2</sup>.dia para o CO<sub>2</sub>, valor menor que o máximo obtido nesses ensaios que foi de 335,1 g/m<sup>2</sup>.dia.

Considerando a área total de aproximadamente 23 mil m<sup>2</sup> da camada do aterro de Içara em que se realizou o estudo, o valor mediano das emissões de 2,27 x 10<sup>-4</sup> g/m<sup>2</sup>.s de CH<sub>4</sub> e a densidade deste gás a 25°C (0,656 kg/m<sup>3</sup>), tem-se o fluxo total pela camada de cobertura de 2,5 x 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>/ano. Esta emissão corresponde a 9,5% das emissões totais providas da degradação dos resíduos dipostos no aterro para o ano de 2008 (2,63 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/ano).



Mariano (2008) ao usar esta mesma metodologia em um aterro na cidade de Aguazinha (PE) encontrou um valor de 8,6%.

A partir dos dados apresentados foram verificadas as correlações entre os fluxos e as condições de ensaio (características do solo e condições climáticas). Na Tabela 24 pode ser verificada a matriz de correlação para os fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, com os valores significativos ( $p < 0,05$ ) destacados em vermelho.

A única correlação significativa encontrada para os dados deste estudo foi para o fluxo de CO<sub>2</sub>. O mesmo teve correlação negativa forte com a temperatura ambiente média do tempo de ensaio.

**Tabela 24. Matriz de correlação entre os fluxos e as variáveis do solo e climáticas.**

Variáveis	Fluxo CH <sub>4</sub>	Fluxo CO <sub>2</sub>
Fluxo CH <sub>4</sub>	1,00	
Fluxo CO <sub>2</sub>	0,42	1,00
Espessura da camada de cobertura	0,30	0,57
$\gamma_{\text{campo}}$	-0,44	0,02
$h_{\text{campo}}$	-0,52	0,14
Pressão atmosférica	-0,12	0,44
Temperatura ambiente média durante o ensaio	-0,56	<b>-0,81</b>
Pluviometria	0,12	0,54
Umidade relativa	-0,24	0,24

## 4.2 ATERRO SANITÁRIO DE TIJUQUINHAS

### 4.2.1 Caracterização do biogás gerado nos drenos

As medidas descritivas das vazões de biogás e de metano nas linhas 1 (L1) e 2 (L2) são apresentadas a seguir (Tabelas 25 e 26). Nas tabelas encontram-se as médias, desvios padrão e valores máximos e mínimos de cada linha durante as extrações passiva e ativa. Foram realizadas 3 observações antes da extração ativa (extração passiva) e 6 após o seu início. Os cálculos de vazão total foram obtidos com a soma das vazões de cada dreno por

observação. Os valores de vazão de metano foram obtidos pelo produto entre as concentrações de metano e os valores de vazão de biogás para cada dreno através da média ponderada. Os valores obtidos em cada dreno por observação encontram-se no Apêndice B.

Durante as medições em extração passiva, 6 drenos da L1 (19 no total) e 7 drenos da L2 (15 no total) tinham vazamento de lixiviado e não apresentaram fluxo de gás. Ao iniciar a extração ativa, foram colocados drenos nas tubulações para coleta do lixiviado e o número de drenos sem fluxo caiu para 3 na L1 e zero na L2.

**Tabela 25. Vazão Biogás (Nm<sup>3</sup>/h).**

	<b>Extração</b>	<b>n</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
Passiva	L1	3	1.157,0	159,0	977,5	1.280,3
	L2	3	388,3	49,2	339,8	438,2
	Vazão total	3	1.545,3	206,1	1.317,3	1.718,5
Ativa	L1	6	1.329,4	125,3	1.200,0	1.493,5
	L2	6	726,8	193,8	534,7	926,8
	Vazão total	6	2.056,2	88,6	1.936,1	2.183,8

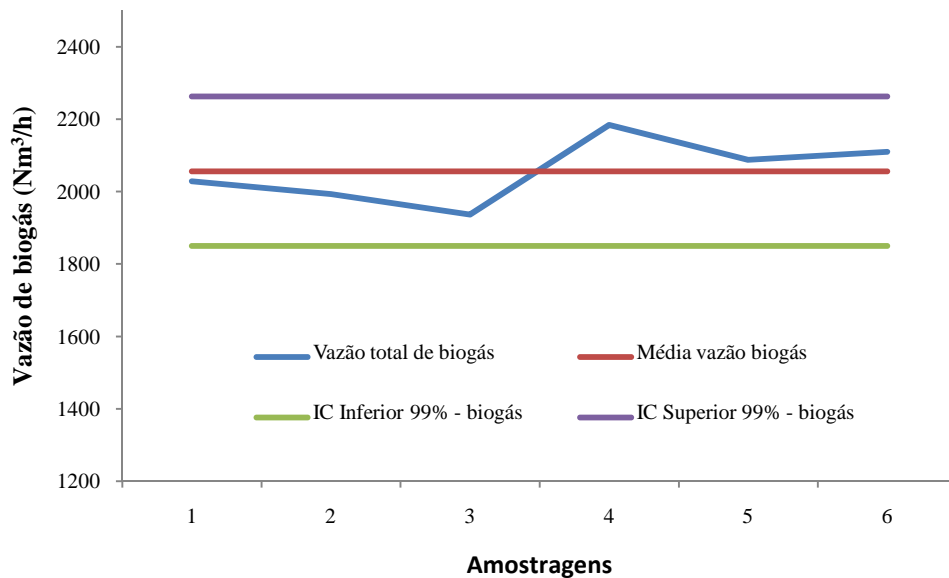
A extração ativa estabilizou o fluxo do biogás nas amostragens realizadas, e verificou-se que o coeficiente de variação das amostragens da vazão média caiu de 13% para 4%. Além disso, houve um incremento de 33% na vazão. Já para a vazão de metano, o coeficiente de variação caiu de 11% para cerca de 5% e o incremento foi de apenas 25%.

**Tabela 26. Vazão Metano (Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/h).**

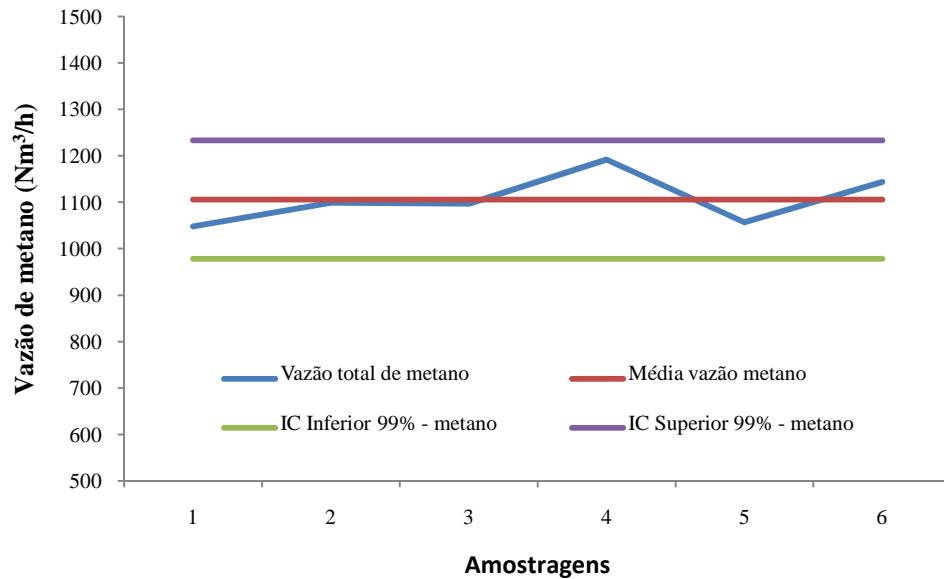
	<b>Extração</b>	<b>n</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
Passiva	L1	3	659,03	74,94	573,36	712,38
	L2	3	224,17	24,84	198,97	248,63
	Vazão total	3	883,20	98,59	772,33	961,01
Ativa	L1	6	706,44	82,08	575,93	800,85
	L2	6	399,48	98,55	297,72	497,45
	Vazão total	6	1.105,92	54,06	1.047,99	1.191,70

As estimativas da produção de biogás e metano foram obtidas a partir das 6 observações realizadas no aterro em extração ativa, pois além dessa fase apresentar maior número de observações, também apresentou menores variações. Da mesma forma que na seção 4.1.1, utilizou-se para os cálculos a distribuição *t* de *Student*.

As vazões totais de biogás e de metano em extração ativa obtidas nos 6 ensaios, seus valores médios e os seus intervalos inferior e superior com 99% de confiança são apresentados a seguir (Figuras 49 e 50). Para a amostragem realizada, a estimativa da média da extração de biogás do aterro de Tijuquinhas nas L1 e L2 com extração forçada foi de 2056,2 Nm<sup>3</sup>/h com variação de 206,3 Nm<sup>3</sup>/h. Já para a vazão de metano, obteve-se o valor médio de 1105,9 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/h com variação de 127,4 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/h.



**Figura 49. Vazões médias de biogás e intervalos de confiança 99%.**



**Figura 50. Vazões médias de metano e intervalos de confiança 99%.**

No cálculo da taxa de geração de biogás, considerou-se que L1 coleta 70% e L2 coleta 30% do biogás gerado no aterro. Ao calcular a taxa com a estimativa da vazão das duas linhas, com 2 milhões de toneladas de resíduos em L2 e cerca de 500 mil toneladas em L1, encontrou-se uma faixa entre 16,7 Nm<sup>3</sup>/t.ano e 20,4 Nm<sup>3</sup>/t.ano. Ao calcular as taxas separadamente para L1 e L2, uma vez que as mesmas possuem resíduos com idades muito diferentes, o valor sobe para 33,5 Nm<sup>3</sup>/t.ano em L1 e decresce para 10,3 Nm<sup>3</sup>/t.ano em L2.

Da mesma forma que o aterro anterior, esse valor está acima da faixa encontrada na literatura. O valor obtido apenas para L1 é um pouco maior ao obtido no aterro de Içara, pois os mesmos têm resíduos depositados com características semelhantes (composição e idade). Porém o valor maior no aterro de Tijuquinhas pode ser atribuído à extração forçada e à maior quantidade de resíduos.

Na Tabela 27 podem ser observadas as concentrações médias ponderadas, em relação à vazão, com seus respectivos desvios padrão e valores máximos e mínimos dos gases analisados nas 3 amostragens passivas e nas 6 ativas do aterro sanitário de Tijuquinhas. Os valores médios de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> estão de acordo aos encontrados na literatura, apresentados na Tabela 4 da seção 2.3.2. As concentrações de H<sub>2</sub>S também foram baixas neste aterro, porém apresentaram menores desvios em relação ao aterro de Içara.

Verificou-se que com a extração forçada e o aumento da vazão, os gases CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> tiveram quedas em suas concentrações médias com aumento dos desvios. A concentração de

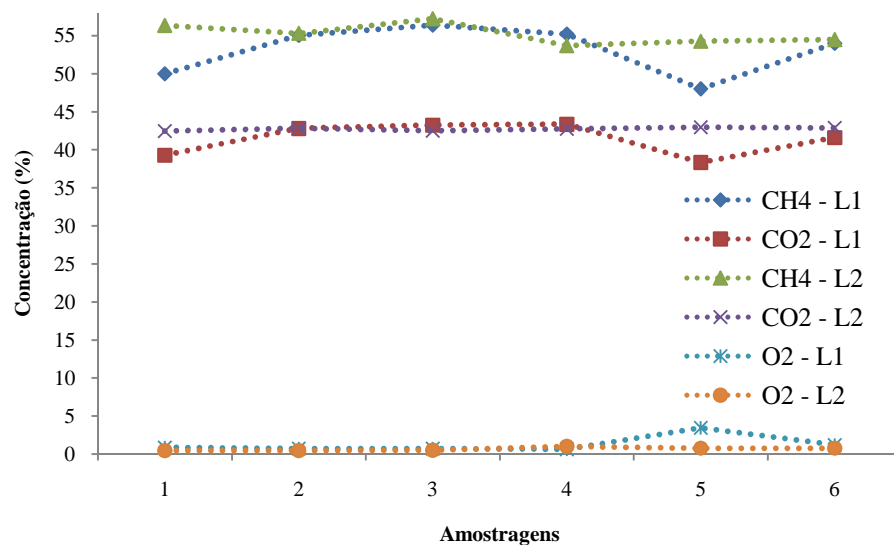
H<sub>2</sub>S também diminuiu, porém não teve aumento de desvio. As diminuições das concentrações de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S estão associadas ao aumento de oxigênio, sendo que estas variações podem ter sido ocasionadas pela entrada de ar na massa de resíduos devido à extração forçada.

**Tabela 27. Concentração média dos gases.**

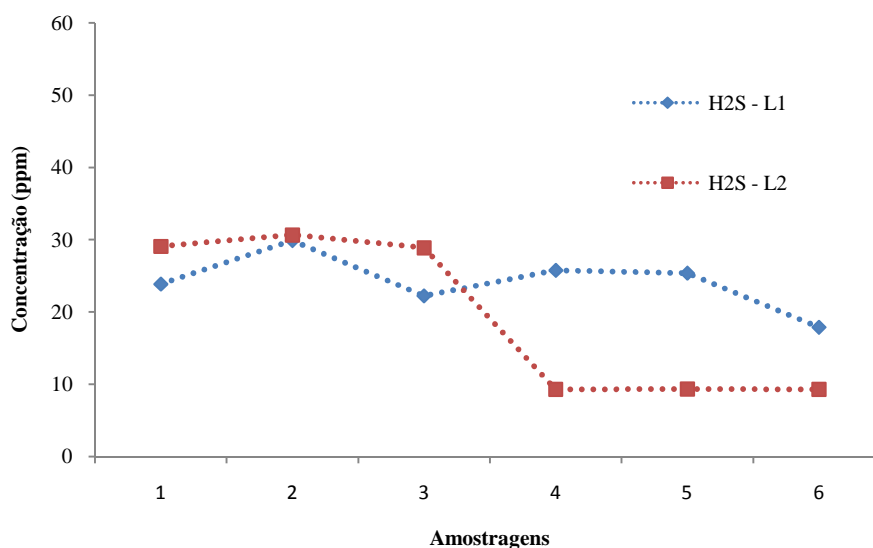
Extração		Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
Passiva	CH <sub>4</sub>	57,3	1,4	55,9	58,6
	CO <sub>2</sub>	43,0	1,1	41,7	43,8
	O <sub>2</sub>	0,4	0,1	0,3	0,6
	H <sub>2</sub> S	30,7	6,7	23,5	36,7
Ativa	CH <sub>4</sub>	53,8	2,2	50,7	56,7
	CO <sub>2</sub>	41,9	1,4	40,1	43,1
	O <sub>2</sub>	1,0	0,6	0,7	2,3
	H <sub>2</sub> S	21,8	5,7	14,2	30,1

Os valores de concentração obtidos por dreno nas amostragens encontram-se no Apêndice B.

As Figuras 51 e 52 apresentam as variações das concentrações de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, nas Linhas 1 e 2 durante a extração forçada, podendo verificar como se comportaram as variações dos valores no decorrer das observações. Na Figura 51 verifica-se apenas uma queda acentuada nas concentrações de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> com aumento do O<sub>2</sub> na L1. A queda de aproximadamente 20 ppm na concentração do H<sub>2</sub>S na L2 (amostragem 4) coincidiu com a queda de mais de 5% na concentração de CH<sub>4</sub>.



**Figura 51. Variações nas concentrações de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> E O<sub>2</sub>.**



**Figura 52. Variações nas concentrações H<sub>2</sub>S.**

A partir dos dados apresentados (vazões e concentrações) e em posse dos valores das condições climáticas como pluviometria, temperatura ambiente média, pressão atmosférica e umidade relativa, verificou-se a correlação de Spearman entre as variáveis para todos os drenos (extrações passiva e ativa). Na Tabela 28 pode ser verificada a matriz de correlação para as variáveis de todos os drenos, com os valores significativos ( $p < 0,05$ ) destacados em vermelho.

**Tabela 28. Matriz de correlação entre as variáveis.**

Variáveis	Vazão biogás	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
Vazão biogás	1,00				
CH <sub>4</sub>	<b>-0,22</b>	1,00			
CO <sub>2</sub>	<b>0,32</b>	-0,02	1,00		
O <sub>2</sub>	<b>0,27</b>	<b>-0,30</b>	<b>-0,21</b>	1,00	
H <sub>2</sub> S	0,01	<b>0,35</b>	<b>0,23</b>	<b>-0,42</b>	1,00
Temp. gás	<b>0,39</b>	-0,08	<b>0,33</b>	-0,01	<b>0,28</b>
Temp. ambiente média	<b>0,23</b>	<b>-0,30</b>	0,11	-0,12	<b>0,15</b>
Pluviometria	-0,04	0,12	0,06	-0,03	0,08
UR	<b>0,54</b>	-0,05	0,08	0,08	0,13
Pressão atmosférica	-0,03	<b>0,21</b>	0,00	0,00	-0,06

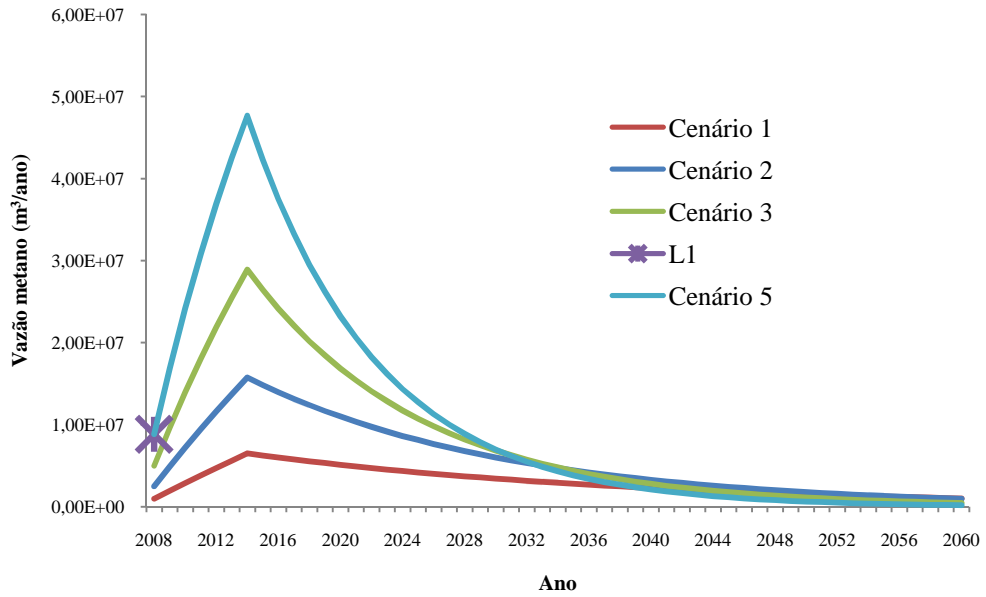
As correlações encontradas foram fracas ou moderadas, destacando a influência positiva da umidade relativa na vazão (0,54). Foi encontrada uma correlação fraca e negativa entre a vazão do biogás e a concentração de  $\text{CH}_4$ , fato esse observado anteriormente na mudança do processo de extração do gás.

Algumas correlações coincidiram com as encontradas no aterro de Içara, porém com menor intensidade tais como: vazão do biogás e  $\text{CO}_2$ , vazão do biogás e temperatura do gás,  $\text{CH}_4$  e  $\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$  e temperatura do gás,  $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ . Porém, outras tiveram influência inversa, tais como: vazão do biogás e  $\text{CH}_4$ , vazão do biogás e  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e temperatura ambiente média. A relação entre o  $\text{CH}_4$  e o  $\text{H}_2\text{S}$  pode ser verificada, por exemplo, na queda verificada anteriormente nas Figuras 51 e 52 de ambas as concentrações.

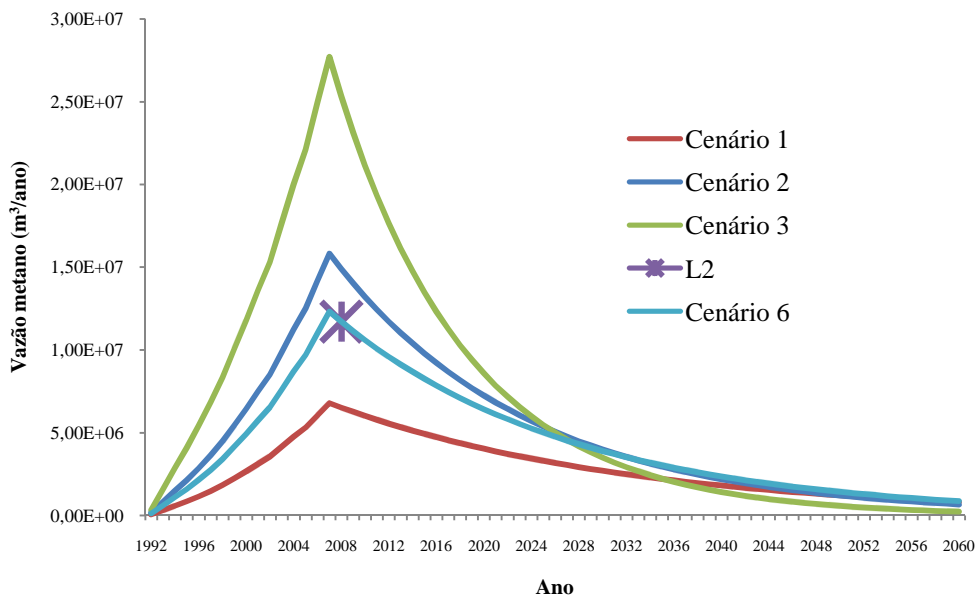
#### **4.2.2 Estimativa teórica da geração de metano**

Na estimativa da geração teórica de metano as linhas L1 e L2 foram analisadas separadamente. Os valores obtidos em campo foram acrescidos de 30% e 70% para L1 e L2, respectivamente. Na Figura 53 podem ser visualizadas as curvas de geração de metano para os 3 cenários propostos inicialmente (Tabela 16 – seção 3.3), e cenário 5 que coincide com o valor da vazão obtida em L1 acrescida dos 30%. Para o cenário 5 obtiveram-se valores bem maiores aos cenários propostos: 0,12 para  $k$  e 300 para  $L_0$ . Esse fato pode ser explicado pela idade (menos de 2 anos) e composição dos resíduos, provavelmente a maior proporção deles tem alta velocidade de degradação.

Na Figura 54 observam-se as curvas de geração de metano para os cenários propostos e o valor obtido em L2, acrescido de 70%, que coincide com o cenário 6 no ano de 2008. Os valores obtidos no cenário 6 são 0,05 para  $k$  e 152 para  $L_0$ . Apesar da grande quantidade de resíduos dispostos, esta área contém resíduos mais antigos e, grande parte do gás gerado atualmente é provinda de resíduos com velocidades de degradação baixas.



**Figura 53. Curvas de geração de metano para em L1.**



**Figura 54. Curvas de geração de metano, incluindo o cenário 6.**

## 4.2.3 Emissões de biogás pela camada de cobertura

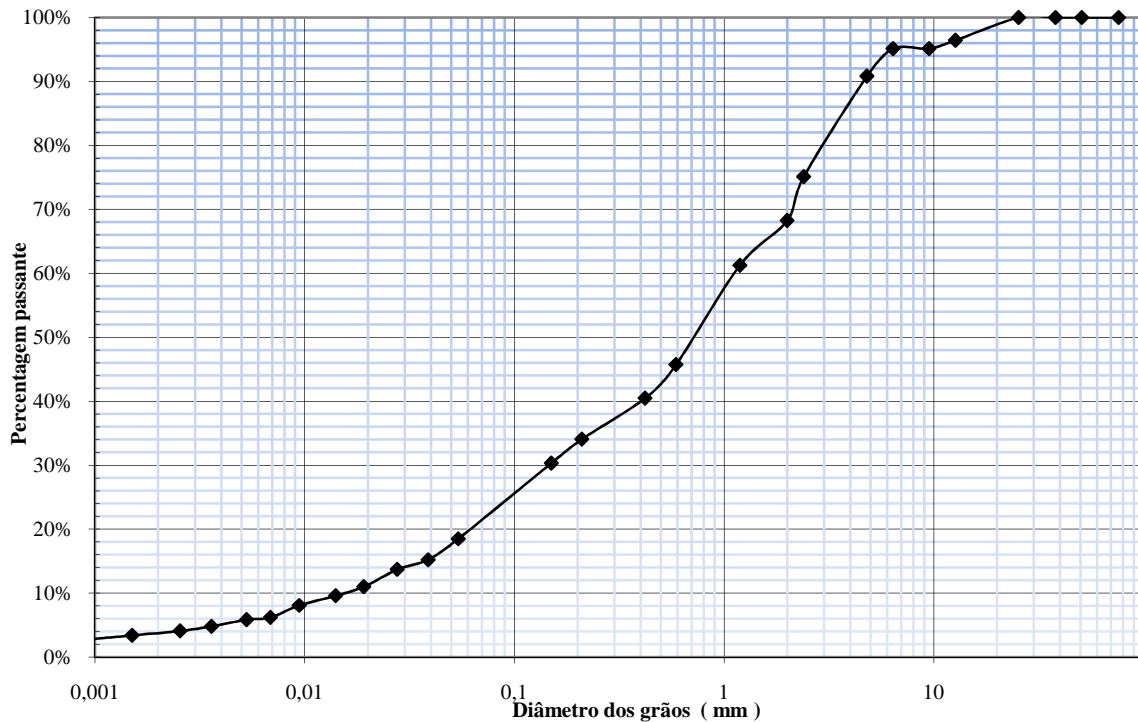
### 4.2.3.1 Caracterização da camada de cobertura

Na Figura 55 verifica-se a curva granulométrica do solo utilizado para camada de cobertura no aterro sanitário de Içara. A composição do solo é de 3,69 % de argila, 14,77 %



de silte, 15,59 % de areia fina, 11,66 % de areia média, 14,48 % de areia grossa e 34,8 % de pedregulho.

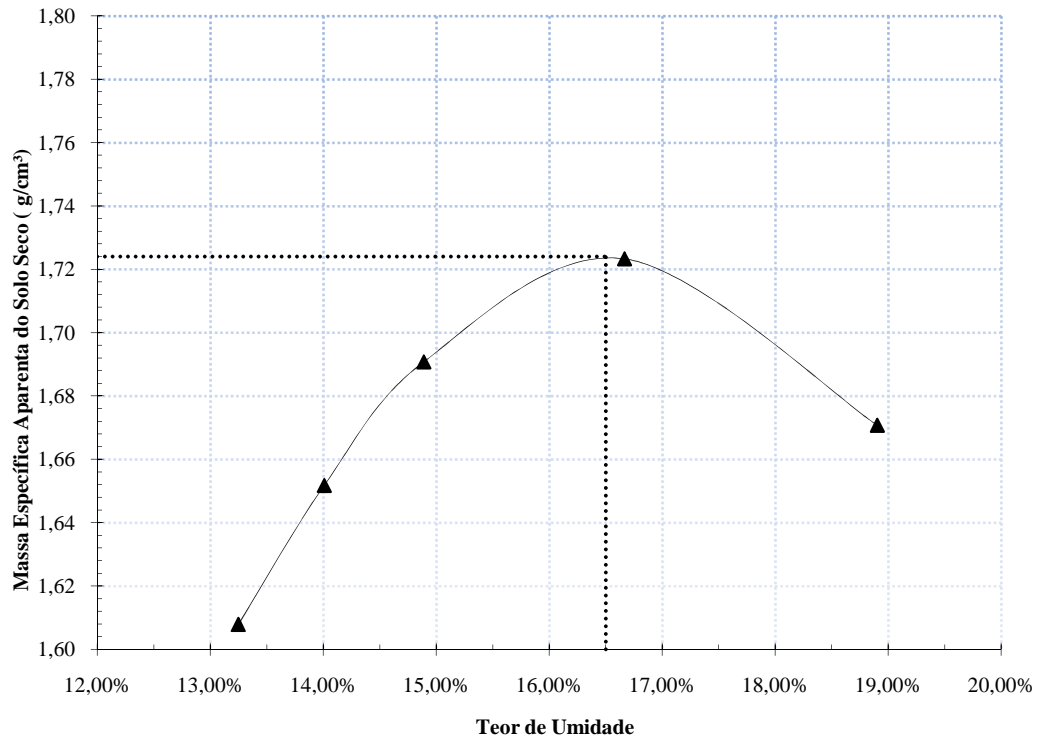
Para este solo não foi possível a obtenção dos Limites de Atterberg, pois o mesmo não é plástico e não apresentou trabalhabilidade para a moldagem dos ensaios. O índice de plasticidade (IP) é de não plástico (NP).



**Figura 55. Curva granulométrica do solo (camada de cobertura) do aterro de Içara.**

Verifica-se que este solo é classificado em areia bem graduada com pedregulho e não plástico, de acordo com o sistema unificado de classificação dos solos (SUCS).

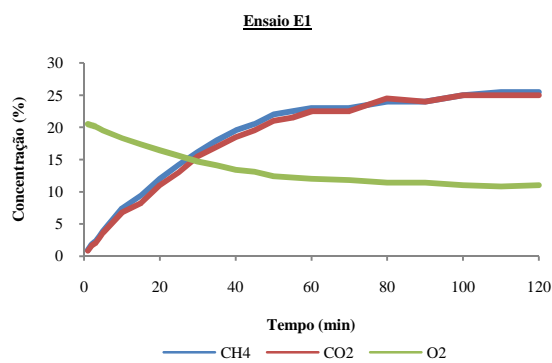
No ensaio de compactação *Proctor Normal*, obtêm-se a curva de compactação em que podem ser determinados os valores de densidade específica máxima do solo seco e umidade ótima. A partir da curva de compactação (Figura 56), do solo em estudo, determinou-se a densidade máxima do solo seco de  $1,72 \text{ g/cm}^3$  e a umidade ótima de 16,5%. Esses valores ideais proporcionam ao solo uma redução no índice de vazios, dificultando o transporte de substâncias, como a emissão de gases.



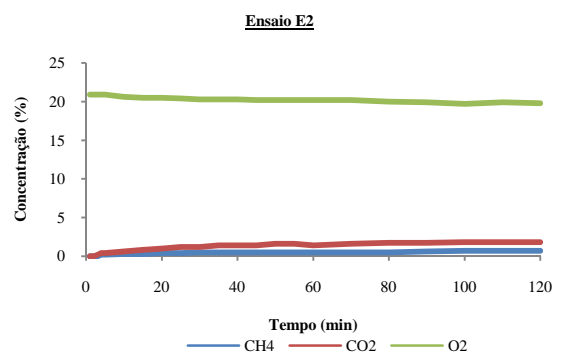
**Figura 56. Curva de compactação do solo (camada de cobertura) do aterro de Içara.**

#### 4.2.3.2 Fluxo de biogás pela camada de cobertura

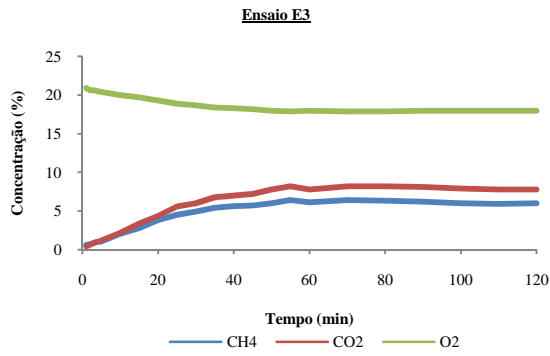
As variações das concentrações de metano, dióxido de carbono e oxigênio no tempo, obtidas nos ensaios E1 a E15, podem ser observadas nas Figuras 57 a 71.



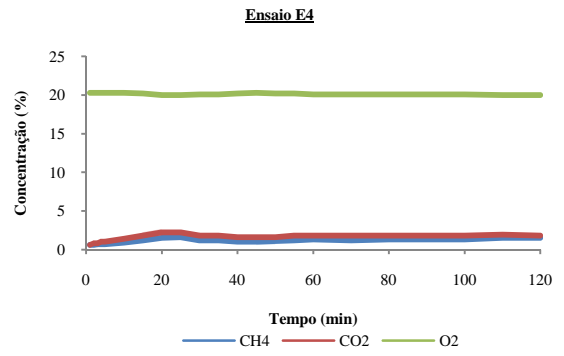
**Figura 57. Ensaio E1 - variação das concentrações no tempo.**



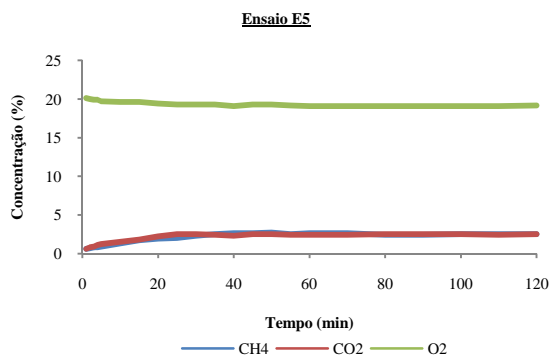
**Figura 58. Ensaio E2 - variação das concentrações no tempo.**



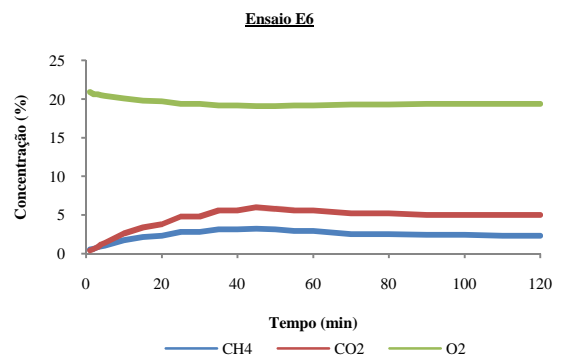
**Figura 59. Ensaio E3 - variação das concentrações no tempo.**



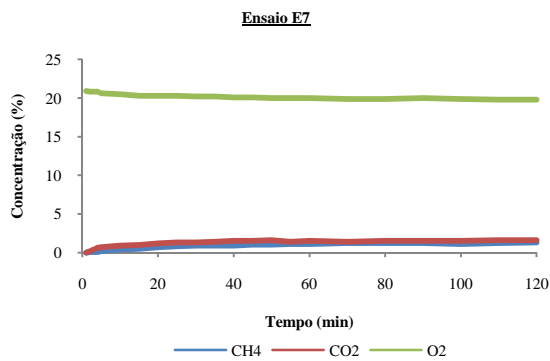
**Figura 60. Ensaio E4 - variação das concentrações no tempo.**



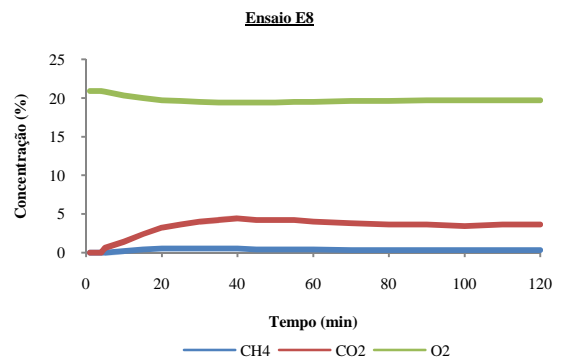
**Figura 61. Ensaio E5 - variação das concentrações no tempo.**



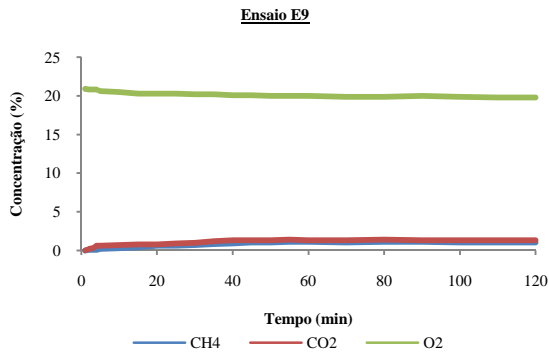
**Figura 62. Ensaio E6 - variação das concentrações no tempo.**



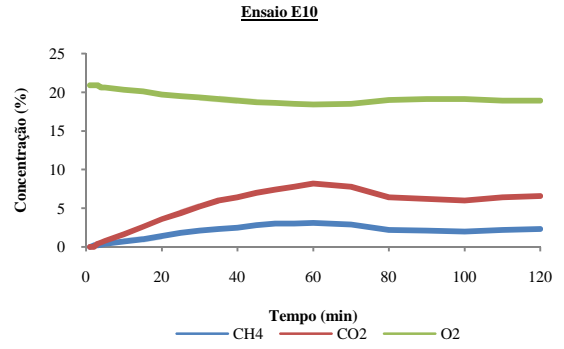
**Figura 63. Ensaio E7 - variação das concentrações no tempo.**



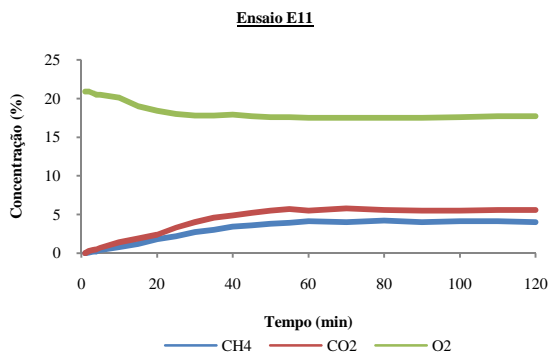
**Figura 64. Ensaio E8 - variação das concentrações no tempo.**



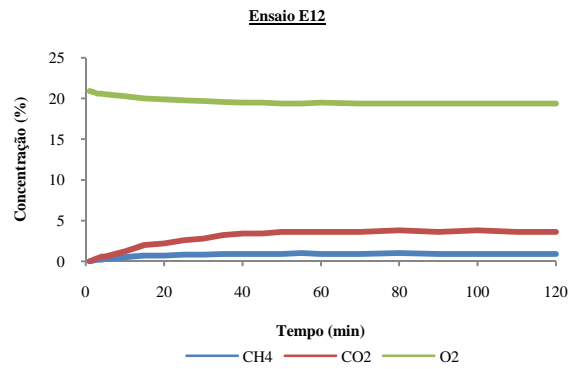
**Figura 65. Ensaio E9 - variação das concentrações no tempo.**



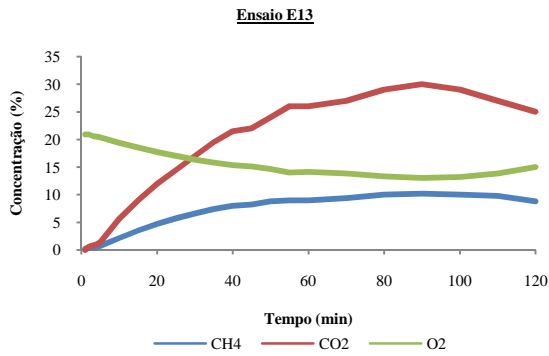
**Figura 66. Ensaio E10 - variação das concentrações no tempo.**



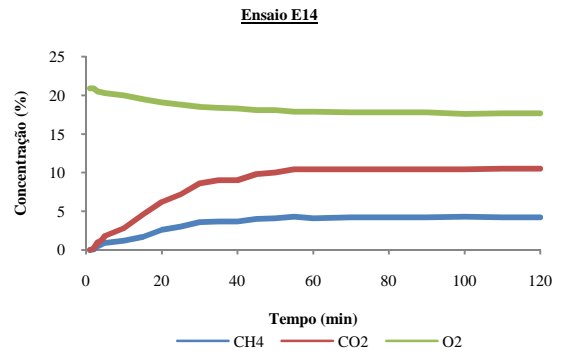
**Figura 67. Ensaio E11 - variação das concentrações no tempo.**



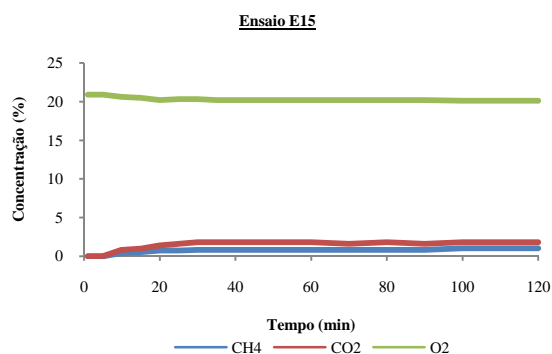
**Figura 68. Ensaio E12 - variação das concentrações no tempo.**



**Figura 69. Ensaio E13 - variação das concentrações no tempo.**

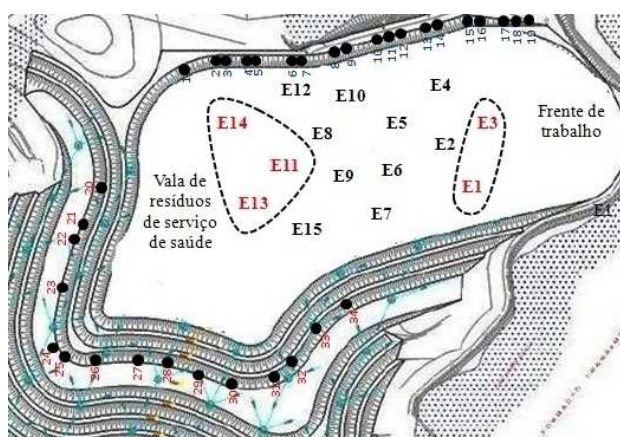


**Figura 70. Ensaio E14 - variação das concentrações no tempo.**



**Figura 71. Ensaio E15 - variação das concentrações no tempo.**

Observa-se que os ensaios que apresentaram maiores variações (E1, E3, E11, E13 e E14) estão nos extremos do aterro conforme Figura 72. Nestes locais ocorre maior movimentação de veículos.



**Figura 72. Locais dos ensaios e pontos de maior variação em destaque.**

As variações da massa de  $\text{CH}_4$  no interior da placa de fluxo encontram-se nas Figuras 73 e 74. Para melhor visualização das curvas, as mesmas foram apresentadas em função da quantidade final de  $\text{CH}_4$  na placa. Os ensaios E2, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E12 e E15 obtiveram quantidades finais de  $\text{CH}_4$  na placa menores que 0,2 g, já os ensaios E1, E3, E11, E13 e E14 obtiveram valores finais acima de 0,2 g chegando a cerca de 1,3 g para o E1.

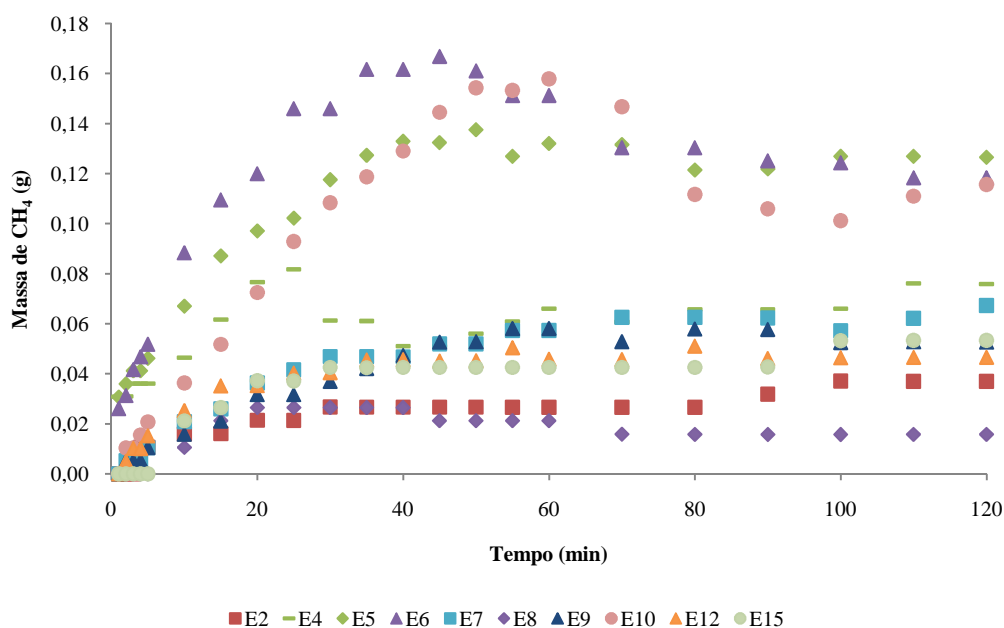


Figura 73. Variação da massa de CH<sub>4</sub> no tempo de ensaio (<0,2 g).

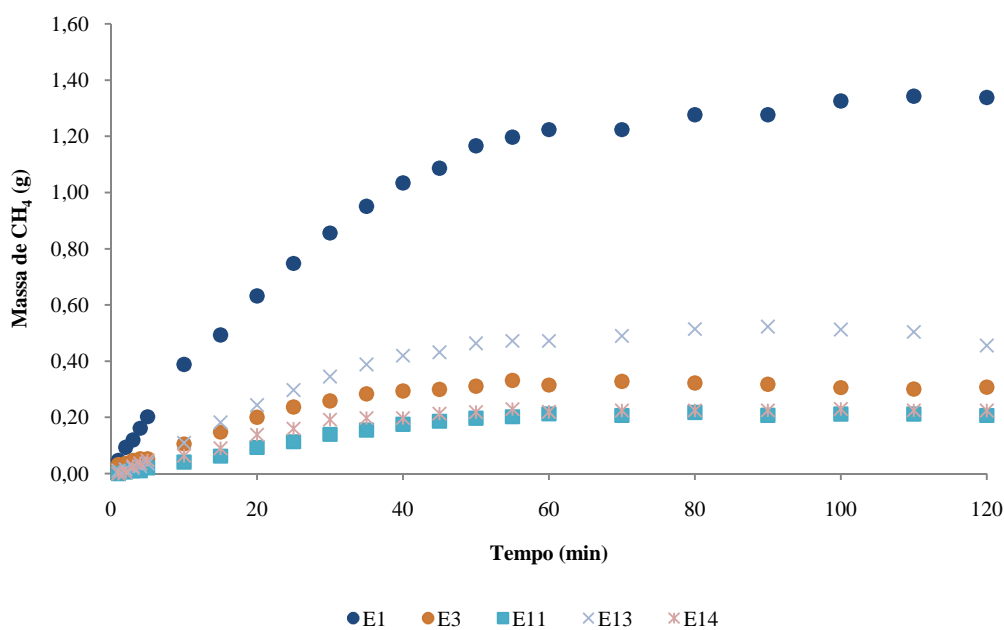


Figura 74. Variação da massa de CH<sub>4</sub> no tempo de ensaio (>0,2 g).

As variações da massa de CO<sub>2</sub> no interior da placa de fluxo encontram-se nas Figuras 75 e 76. Para melhor visualização das curvas, as mesmas também foram apresentadas em função da quantidade final de CO<sub>2</sub> na placa. Os ensaios E2, E4, E5, E7, E8, E9, E12, E15 obtiveram quantidades finais de CO<sub>2</sub> na placa menores que 0,7 g, já os ensaios E1, E3, E6,

E10, E11, E13 e E14 obtiveram valores finais acima de 0,7 g chegando a cerca de 3,6 g para o E1.

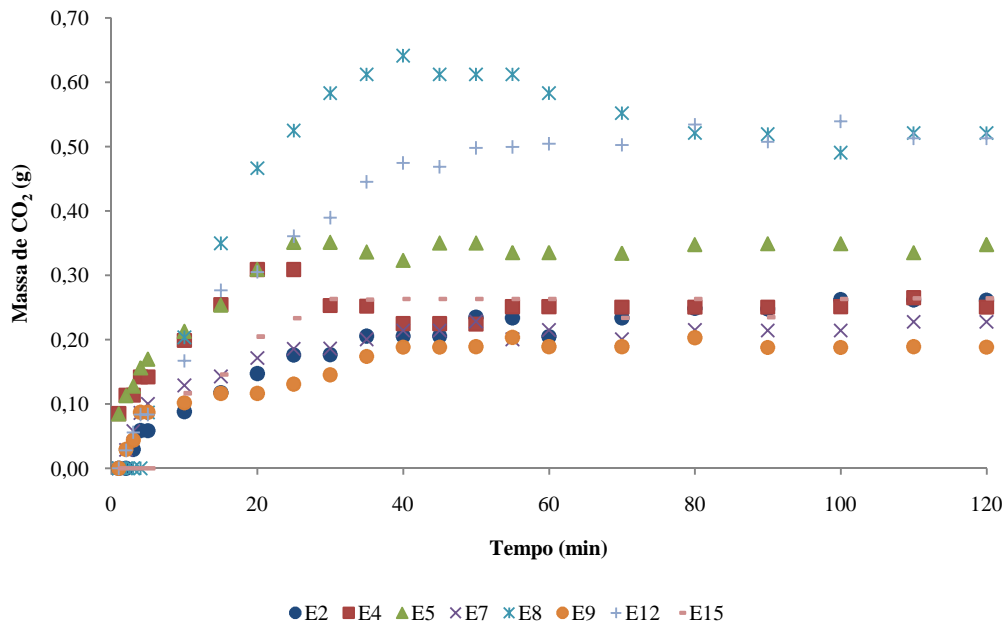


Figura 75. Variação da massa de CO<sub>2</sub> no tempo de ensaio (<0,7 g).

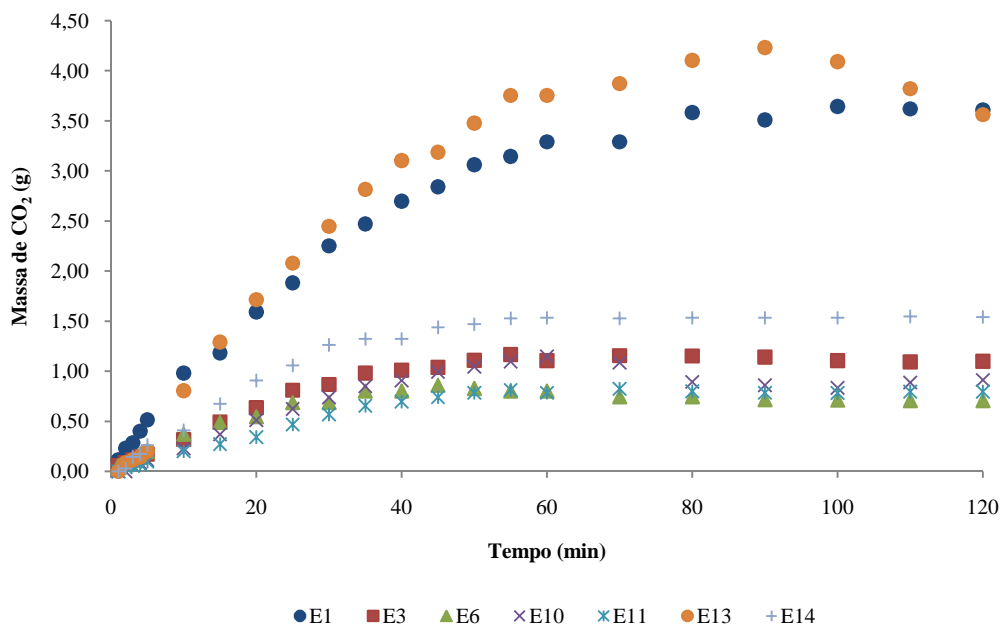
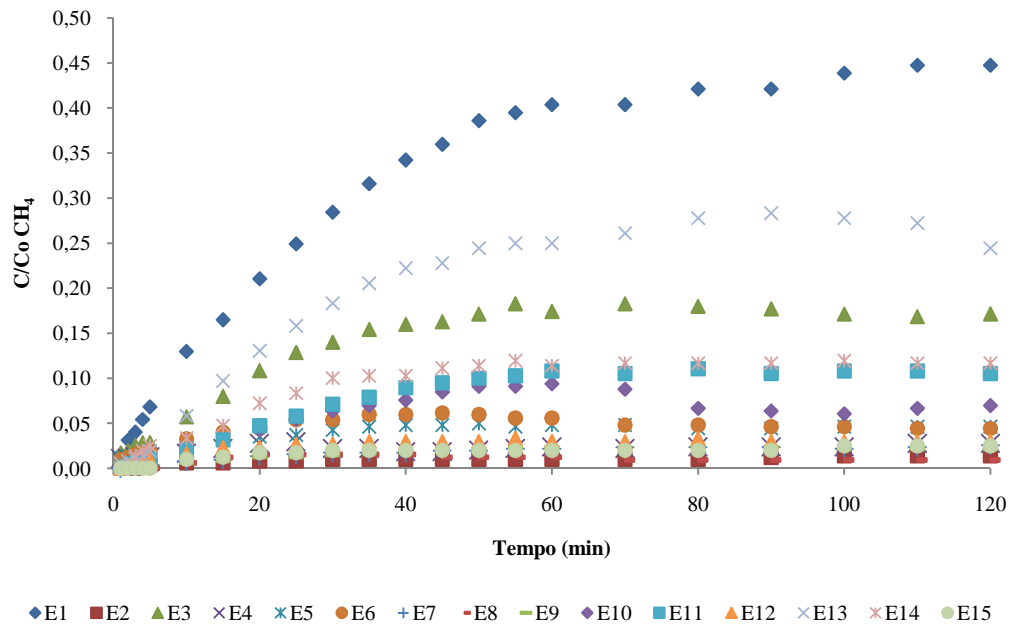


Figura 76. Variação da massa de CO<sub>2</sub> no tempo de ensaio (>0,7 g).

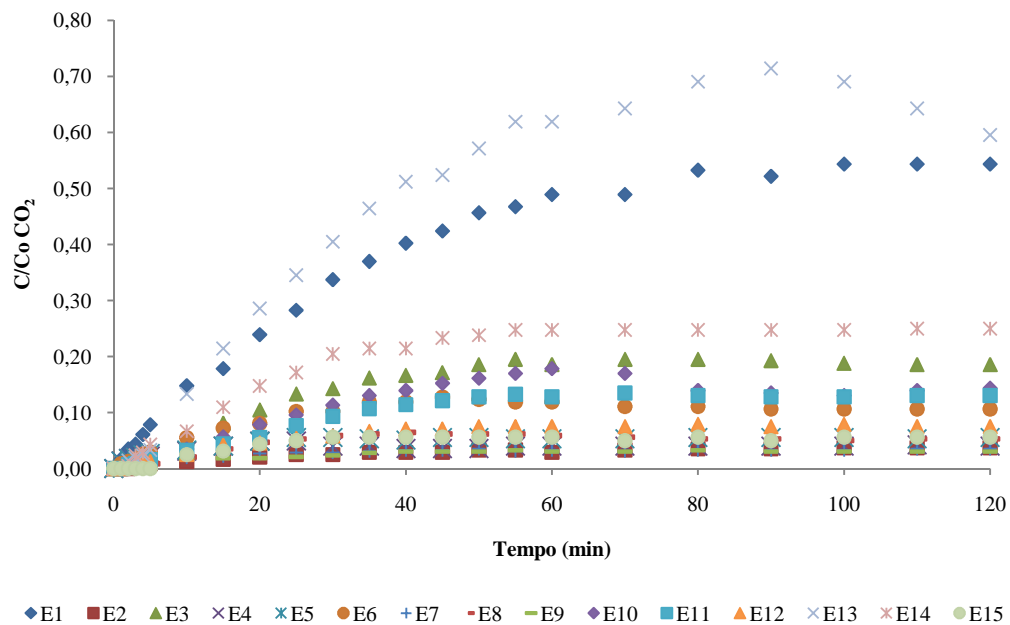
A retenção de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> pela camada de cobertura foi obtida através da relação da concentração do gás obtida no ensaio da placa de fluxo (C) com a concentração obtida direto da massa de resíduos (C<sub>0</sub>). Conforme pôde-se verificar na Figura 77, a camada de cobertura

do aterro deste estudo apresentou valores acima de 90% na retenção de metano para 10 dos 15 ensaios realizados.



**Figura 77. Relação  $C/C_0$  do  $CH_4$  durante os ensaios.**

Na Figura 78, observa-se as curvas de retenção de  $CO_2$  com valores acima de 90% para 8 dos 15 ensaios realizados.



**Figura 78. Relação  $C/C_0$  do  $CO_2$  durante os ensaios.**



A Tabela 29 apresenta a síntese dos resultados de fluxo, bem como as características da camada de cobertura nos locais de ensaio, tais como sua espessura, densidade do solo em campo ( $\gamma_{\text{campo}}$ ) e umidade do solo em campo ( $h_{\text{campo}}$ ).

**Tabela 29. Resultados dos ensaios.**

Ensaio	Espessura da camada (m)	$\gamma_{\text{campo}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$h_{\text{campo}}$ (%)	Fluxo CH <sub>4</sub> (10 <sup>-4</sup> g/m <sup>2</sup> .s)	Quantidade final de CH <sub>4</sub> na placa (g)	Fluxo CO <sub>2</sub> (10 <sup>-4</sup> g/m <sup>2</sup> .s)	Quantidade final de CO <sub>2</sub> na placa (g)
E1	0,80	13,55	20,40	29,06	1,34	76,77	3,61
E2	1,00	16,70	12,80	0,96	0,04	6,35	0,26
E3	0,55	16,22	8,80	8,13	0,31	29,12	1,10
E4	0,82	16,62	13,40	1,09	0,08	6,04	0,25
E5	0,61	14,94	12,80	3,12	0,13	9,58	0,35
E6	0,50	15,72	16,30	4,31	0,12	22,65	0,71
E7	0,63	16,02	15,90	1,69	0,07	6,69	0,23
E8	0,68	16,10	18,60	0,95	0,02	20,94	0,52
E9	0,71	15,93	18,72	1,33	0,05	5,22	0,19
E10	0,60	15,76	18,80	3,89	0,12	26,51	0,91
E11	0,43	14,88	17,63	5,02	0,21	20,46	0,80
E12	0,44	13,43	15,80	1,45	0,05	14,00	0,51
E13	0,32	14,64	19,60	12,02	0,46	87,82	3,56
E14	0,45	15,32	14,30	6,90	0,22	45,34	1,54
E15	0,31	15,08	17,70	1,53	0,05	9,46	0,26

Os fluxos de CH<sub>4</sub> obtidos estão entre 0,95 x 10<sup>-4</sup> g/m<sup>2</sup>.s (E8) e 29,06 x 10<sup>-4</sup> g/m<sup>2</sup>.s (E1) e os de CO<sub>2</sub> entre 5,22 x 10<sup>-4</sup> g/m<sup>2</sup>.s (E9) e 87,82 x 10<sup>-4</sup> g/m<sup>2</sup>.s (E13). Os valores de fluxo de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> deste aterro, assim como os do aterro de Içara, estão dentro das faixas encontradas na literatura para ensaios com placa de fluxo estática (MACIEL, 2003; CHRISTOPHERSEN; POULSEN; KJELDEN, 2001; COSSU et al., 1997; TANAKA; MATSUTO; LEE, 1997).

Considerando a área de realização dos ensaios de aproximadamente 40 mil m<sup>2</sup> da camada de cobertura da zona 3 do aterro de Tijuquinhas, o valor mediano das emissões de 3,12 x 10<sup>-4</sup> g/m<sup>2</sup>.s de CH<sub>4</sub> e a densidade deste gás a 25°C (0,656 kg/m<sup>3</sup>), tem-se o fluxo total pela camada de cobertura de 6,0 x 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>/ano. Esta emissão corresponde a 6,8% das emissões totais provindas da degradação dos resíduos dipostos no aterro para o ano de 2008 (8,84 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/ano). Apesar deste aterro apresentar maior área e maior valor mediano de emissão de CH<sub>4</sub> que o do aterro de Içara, o seu percentual referente às emissões totais pela camada de cobertura foi menor.

A partir dos dados apresentados foram verificadas as correlações entre os fluxos e as condições de ensaio (características do solo e condições climáticas). Na Tabela 30 pode ser verificada a matriz de correlação para os fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, com os valores significativos ( $p < 0,05$ ) destacados em vermelho.

Finalmente, com os dados do aterro de Tijuquinhas, obtiveram-se melhores correlações entre os fluxos de gases e as variáveis do solo e climáticas. Os fluxos tiveram correlação positiva forte entre si (0,80), e correlações negativas moderadas com a umidade relativa (-0,62 para o CH<sub>4</sub> e -0,56 para o CO<sub>2</sub>). A densidade do solo em campo influenciou de forma negativa moderada o fluxo de CH<sub>4</sub>, indicando que os locais com maiores compactações tiveram menores fluxos deste gás.

**Tabela 30. Matriz de correlação entre os fluxos e as variáveis do solo e climáticas.**

Variáveis	Fluxo CH <sub>4</sub>	Fluxo CO <sub>2</sub>
Fluxo CH <sub>4</sub>	1,00	
Fluxo CO <sub>2</sub>	<b>0,80</b>	1,00
Espessura da camada de cobertura	-0,44	-0,41
$\gamma_{\text{campo}}$	<b>-0,53</b>	-0,45
$h_{\text{campo}}$	0,23	0,33
Pressão atmosférica	0,19	0,08
Temperatura ambiente média no ensaio	0,03	-0,08
Pluviometria	-0,01	-0,03
Umidade relativa	<b>-0,62</b>	<b>-0,56</b>

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

### 5.1 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi atingido, uma vez que através da metodologia proposta foram obtidas as estimativas das emissões de biogás nos dois aterros de resíduos sólidos urbanos desta pesquisa. A revisão da literatura auxiliou na elaboração da metodologia e na comparação dos resultados obtidos com sua aplicação.

Em relação à caracterização do biogás, conclui-se que:

- Através dos ensaios realizados foi possível estimar no aterro de Içara uma extração média de biogás entre 433 Nm<sup>3</sup>/h e 523 Nm<sup>3</sup>/h e vazão média de metano entre 188 Nm<sup>3</sup>/h e 232 Nm<sup>3</sup>/h, ambos considerando um intervalo de confiança de 99%. Os drenos que apresentaram a maior contribuição nas vazões de biogás e de metano foram os localizados no centro do aterro onde há maior concentração de resíduos. A taxa de geração atual de biogás deste aterro situou-se entre 24,7 Nm<sup>3</sup>/t.ano e 29,8 Nm<sup>3</sup>/t.ano. A concentração média de biogás para este aterro foi de 46,9% de CH<sub>4</sub>, 37,8% de CO<sub>2</sub>, 4,1% de O<sub>2</sub> e 12 ppm de H<sub>2</sub>S;
- Ao correlacionar os dados obtidos da caracterização do biogás entre eles e com as condições climáticas obtiveram-se correlações fortes entre as concentrações e entre a vazão de biogás com a temperatura do gás, este último justificável pela correção no cálculo da vazão. A única variável que apresentou correlação significativa com as condições climáticas foi a concentração de H<sub>2</sub>S, obtendo correlação positiva moderada com a pressão atmosférica e correlação negativa fraca com a temperatura ambiente. A vazão de biogás apresentou ainda menores correlações positivas com as concentrações de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, e negativa com a concentração de O<sub>2</sub>;
- Já para o aterro de Tijuquinhas, as vazões médias de biogás e de metano em extração ativa, com 99% de confiança, foram de 2056,2 Nm<sup>3</sup>/h com variação de 206,3 Nm<sup>3</sup>/h e 1106,0 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/h com variação de 127,4 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/h. No cálculo da taxa de geração de biogás, encontrou-se uma faixa entre 16,7 Nm<sup>3</sup>/t.ano e 20,4 Nm<sup>3</sup>/t.ano para L1 e L2 em conjunto. Ao calcular as taxas separadamente para L1 e L2, uma vez que as mesmas possuem resíduos com idades muito diferentes, o valor aumentou para 33,5

$\text{Nm}^3/\text{t.ano}$  em L1 e decresceu para  $10,3 \text{ Nm}^3/\text{t.ano}$  em L2. O valor obtido apenas para L1 foi um pouco maior ao obtido no aterro de Içara, atribuindo-se esse fato à extração forçada e à maior quantidade de resíduos de Tijuquinhas, apesar de ambos terem resíduos depositados com características semelhantes (composição e idade);

- No aterro de Tijuquinhas a extração ativa aumentou o fluxo do biogás em 33% e o manteve com menores variações. Entretanto, o aumento de vazão provocou quedas nas concentrações médias de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$  e um incremento na concentração média de oxigênio, sendo que estas variações podem ter sido ocasionadas pela entrada de ar na massa de resíduos devido à extração forçada;
- A concentração média de biogás para o aterro de Tijuquinhas foi de 57,3% de  $\text{CH}_4$ , 43,0% de  $\text{CO}_2$ , 0,4% de  $\text{O}_2$  e 30,7 ppm de  $\text{H}_2\text{S}$  durante a extração passiva e 53,8% de  $\text{CH}_4$ , 41,9% de  $\text{CO}_2$ , 1,0% de  $\text{O}_2$  e 21,8 ppm de  $\text{H}_2\text{S}$  na extração ativa;
- Nas correlações para o aterro de Tijuquinhas encontrou-se influência positiva moderada da umidade relativa na vazão do biogás. Além disso, foi observada a influência fraca negativa entre a vazão do biogás e a concentração de  $\text{CH}_4$ , fato esse observado anteriormente na mudança do processo de extração do gás;
- Algumas correlações observadas no aterro de Tijuquinhas coincidiram com as encontradas no aterro de Içara, porém com menor intensidade tais como: vazão do biogás e concentração de  $\text{CO}_2$ , vazão do biogás e temperatura do gás, concentração de  $\text{CH}_4$  e  $\text{O}_2$ , concentração de  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2\text{S}$ , concentração de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ , concentração de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ , concentração de  $\text{CO}_2$  e temperatura do gás e concentração de  $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ . Porém, outras tiveram influência inversa, tais como: vazão do biogás e concentração de  $\text{CH}_4$ , vazão do biogás e concentração de  $\text{O}_2$ , concentração de  $\text{H}_2\text{S}$  e temperatura ambiente média.

Quanto à estimativa teórica da geração de biogás:

- A vazão estimada para o aterro de Içara ficou muito próxima a um dos cenários propostos com os valores de  $k$  e  $L_0$  sugeridos pela literatura, de  $0,09 \text{ ano}^{-1}$  e  $225 \text{ m}^3/\text{t}$  respectivamente, para as características de pluviometria local e composição dos resíduos;

- Para o aterro de Tijuquinhas, as estimativas para L1 e L2 foram realizadas separadamente devido à diferença de idade entre os resíduos das mesmas. Os cenários que coincidiram com a vazão atual foram diferentes dos propostos inicialmente. Para L1 obtiveram-se valores de bem maiores aos cenários propostos:  $0,12 \text{ ano}^{-1}$  para  $k$  e  $300 \text{ m}^3/\text{t}$  para  $L_0$ . Esse fato pode ser explicado pela idade (menos de 2 anos) e composição dos resíduos, provavelmente a maior proporção deles tem alta velocidade de degradação. Já para L2 encontrou-se  $0,05 \text{ ano}^{-1}$  para  $k$  e  $152 \text{ m}^3/\text{t}$  para  $L_0$ . Esses valores menores podem ser justificados pelo fato de grande parte do gás gerado atualmente nessa área ser provindo de resíduos antigos com velocidades de degradação baixas.

Finalmente, sobre as emissões de biogás pela camada de cobertura:

- Na caracterização do solo utilizado como camada de cobertura de Içara verificou-se que o mesmo é classificado como areno-siltoso com pouco de argila, bem graduado e com baixa plasticidade e seus valores de densidade específica máxima do solo seco de  $1,75 \text{ g/cm}^3$  e umidade ótima de 16,1%. Nos locais de realização dos ensaios constatou-se grau de compactação entre 77% e 95%;
- Os ensaios que apresentaram as maiores variações de concentrações durante os ensaios estão ao redor do dreno 3 que apresentou menor vazão entre os drenos centrais deste aterro. Como durante os ensaios não foram encontradas fissuras na camada de cobertura que pudessem ter comprometido o resultado dos ensaios, sugere-se uma investigação deste dreno, uma vez que o mesmo pode estar obstruído;
- A camada de cobertura do aterro de Içara apresentou valores de retenção de  $\text{CH}_4$  acima de 90% para 8 dos 10 ensaios realizados e retenções de  $\text{CO}_2$ , acima de 90% para 7 dos 10 ensaios;
- Verificou-se que no aterro de Içara o local com maior fluxo de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  apresentou a maior espessura de camada de cobertura. Os fluxos de  $\text{CH}_4$  estiveram entre  $0,36 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2.\text{s}$  e  $20,22 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2.\text{s}$  e os de  $\text{CO}_2$  entre  $5,03 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2.\text{s}$  e  $38,79 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2.\text{s}$ . Considerando a área total da camada do aterro, obteve-se o fluxo total de  $\text{CH}_4$  pela camada de cobertura de  $2,5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{ano}$ . Esta emissão corresponde a 9,5% das

emissões totais provindas da degradação dos resíduos dipostos no aterro para o ano de 2008 ( $2,63 \times 10^6 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{ano}$ );

- A única correlação significativa encontrada para os dados do aterro de Içara foi para o fluxo de  $\text{CO}_2$ , tendo a influência negativa forte com a temperatura ambiente média do tempo de ensaio;
- Na caracterização do solo utilizado como camada de cobertura de Tijuquinhas verificou-se que o mesmo é classificado em areia bem graduada com pedregulho e não plástico e seus valores de densidade específica máxima do solo seco de  $1,72 \text{ g/cm}^3$  e umidade ótima de 16,5%. Nos locais de realização dos ensaios constatou-se grau de compactação entre 80% e 99%;
- Os ensaios que apresentaram maiores variações no aterro de Tijuquinhas foram os realizados nos extremos do aterro, locais onde ocorre maior circulação de veículos. Foram verificadas retenções de metano acima de 90% para 10 dos 15 ensaios realizados e de  $\text{CO}_2$  para 8 dos 15 ensaios realizados;
- Os fluxos de  $\text{CH}_4$  obtidos no aterro de Tijuquinhas estiveram entre  $0,95 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2.\text{s}$  e  $29,06 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2.\text{s}$  e os de  $\text{CO}_2$  entre  $5,22 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2.\text{s}$  e  $87,82 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2.\text{s}$ . Considerando a área de realização dos ensaios obteve-se o fluxo total pela camada de cobertura de  $6,0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{ano}$ . Esta emissão corresponde a 6,8% das emissões totais provindas da degradação dos resíduos dipostos no aterro para o ano de 2008. Apesar deste aterro apresentar maior área e maior valor mediano de emissão de  $\text{CH}_4$  que o do aterro de Içara, o seu percentual referente às emissões totais pela camada de cobertura foi menor;
- Finalmente, com os dados do aterro de Tijuquinhas, obtiveram-se melhores correlações entre os fluxos de gases e as variáveis do solo e climáticas. Os fluxos de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  tiveram correlação positiva forte entre si, e correlações negativas moderadas com a umidade relativa. A densidade do solo em campo influenciou de forma negativa moderada o fluxo de  $\text{CH}_4$ , indicando que os locais com maiores compactações tiveram menores fluxos deste gás.

## 5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como sugestão para trabalhos futuros coloca-se a necessidade da expansão dos ensaios em campo realizados por este trabalho para o ponto de vista da viabilidade econômica da implantação do projeto de aproveitamento energético mais adequado a realidade local, ampliando o estudo já realizado.

Além disso, verifica-se a necessidade de estudos com solos de cobertura mais eficientes na retenção de biogás ou com camadas oxidativas que transformam biologicamente o metano em dióxido de carbono e água.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7185**: Solo - Determinação da massa específica aparente, “in situ”, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 1986. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180 - Errata n. 1**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1988. 1p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 63p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL - SANTA CATARINA (ABES/SC). **Verificação da sustentabilidade das ações do programa “Lixo nosso de cada dia” realizado pelo Ministério Público de Santa Catarina**. Relatório do plano de pesquisa, listando os problemas e conflitos emergentes. ABES/SC, 2006. 204p.

AITCHISON, E. **Methane generation from UK landfill sites and its use as an energy resource**. In: Energy Conversion and Management, v. 37, n. 6, p. 1111-1116, junho 1996.

BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. **Estatística para cursos de engenharia e informática**. 2.ed. São Paulo: Atlas, 2008. 410p.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. São Carlos: USP, EESC, 1999. 109p.



BÖRJESSON, G; GALLE, B.; SAMUELSSON, J.; SVENSSON, B. H. **Methane emissions from landfills: options for measurement and control**. In: Proceedings of the Waste 2000 Conference – Waste Management at the dawn of the third millennium, p. 31-40, Stratford-upon-Avon, Warwickshire, outubro 2000.

CADAVID PÉREZ, P. B. **Análise técnico-econômica para aproveitamento energético do gás gerado em aterros sanitários utilizando pilhas a combustível: “O caso do município de Campinas - SP - Brasil**. Campinas, 2004. 183p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

CASSINI, S. T.; VAZOLLER, R. F.; PINTO, M. T. In: **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. CASSINI, S. T. (Coordenador). Rio de Janeiro: ABES, RIMA, 2003. p. 1-9.

CASTILHOS JR, A. B.; MEDEIROS, P. A.; FIRTA, I. N.; LUPATINI, G.; SILVA J. D. **Principais processos de degradação de resíduos sólidos urbanos**. In: Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para municípios de pequeno porte. CASTILHOS JR, A. B. (Coordenador). Rio de Janeiro: ABES, RIMA, 2003. p. 19-50.

CASTILHOS JR, A. B.; REICHERT, G. A. **Projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários**. CASTILHOS JR, A. B. (Coordenador). Florianópolis: UFSC, 2007. 92p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Emissões de metano no tratamento e na disposição de resíduos**. In: Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa - Relatórios de referência. São Paulo: MCT, 2006.

CONPET. Programa nacional da racionalização do uso dos derivados de petróleo e do gás natural. **Gás natural**. Disponível em <<http://www.conpet.gov.br>>. Acesso em abril 2008. 1997.

COSSU, R.; MUNTONI, A.; CHIARANTINI, L.; MASSACCI, G.; SERRA, P.; SCOLLETTA, A.; STERZI, G. **Biogas emissions measurements using static and dynamic flux chambers and infrared methods**. In: Proceedings of the sixth international landfill symposium, Sardinia, vol.4, p.103-114, Itália, 1997.

COSTA, D. F. **Biomassa como fonte de energia, conversão e utilização**. São Paulo, 2002. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia.

CHRISTOPHERSEN, M.; POULSEN, T. G.; KJELDSEN, P. **Modelling lateral gas migration and subsequent emission in soil adjacent to and old unlined landfill**. In: Proceedings of the eighth international landfill symposium, Sardinia, vol.2, p.475-484, Itália, 2001.

CZEPIEL, P. M.; MOSHER, B.; HARRISS, R. C.; SHORTER, J. H. MCMANUS, J.B.; KOLB, C. E.; ALLWINE, E.; LAMB, B. K. **Landfill methane emissions measured by**

**enclosure and atmospheric trace methods.** In: Journal of geophysical research, vol. 101, n.D11, p.16,711-16,719, 1996.

D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado.** 2.ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000. 370p.

DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão.** 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1983. 476p.

DENMEAD, O. T.; RAUPACH, M. R. **Methods for measuring atmospheric gas transport in agricultural and forest systems.** In: Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change. Madison: ASA, CSSA, SSSA, n.55, p.19-43, 1993.

EL-FADEL, M.; FINDIKAKIS, A. N.; LECKIE, J. O. **Environmental impacts of solid waste landfill.** In: Journal of environmental management, v.50, n.1, p.1-25, 1997.

EMCON A. **State-of-the-art of methane gas enhancement in landfills.** Report to Argonne National Laboratory (ANL/CNSV-23), Argonne, 1981.

EMCON A. **Municipal solid waste landfill gas design plan review.** APTI Workshop T018, North Carolina State University, Environmental Programs, Raleigh, 1998.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas - SP.** Campinas, 2003. 145p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

ESMAP. **The world bank handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean.** Waterloo, Ontario, 2004.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). **O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL: guia de orientação.** Rio de Janeiro: FGV, 2002. 90p.

GOMES, L. P.; MARTINS, F. B. **Projeto, implantação e operação de aterros sustentáveis de resíduos sólidos urbanos para municípios de pequeno porte.** In: Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para municípios de pequeno porte. CASTILHOS JR, A. B. (Coordenador). Rio de Janeiro: ABES, RIMA, 2003. p.51-105.

GUEDES, V. P. **Estudo do fluxo de gases através do solo de cobertura de aterro de resíduos sólidos urbanos.** Rio de Janeiro, 2007. 117p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE).

GUNNERSON C. G.; STUCKEY, D. C. **Anaerobic digestion.** Tech. Pap. 49, World Bank, Washington, D.C, 1986.

HAM, R. K.; BARLAZ, M. A. **Measurement and prediction of landfill gas quality and quantity in sanitary landfilling: process, technology and environmental impact.** U.K.: Academic Press, p.155-156. 1989.

HAMADA J. **Aterros sanitários: concepção e dimensionamento**. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Bauru, 2008. 146p.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica**. Rio de Janeiro, 2004. 189p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE).

HUTCHINSON G. L.; LIVINGSTON, G. P. **Use of chamber systems to measure trace gas fluxes**. In: Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change. Madison: ASA, CSSA, SSSA, n.55, p.63-78, 1993.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000**. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acessado em: março 2008. 2000.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for national greenhouse inventories: reference manual**. Vol.3. Disponível em: <[www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6)>. Acessado em fevereiro 2008. 1996

JUCÁ, J. F. T. **Destinação atual dos resíduos sólidos no Brasil: situação atual e perspectivas**. In: 10º Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais... Portugal, 2002.

JUCÁ, J. F. T. **Disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil**. In: Simpósio Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 5. Anais... Porto Alegre, 2003.

JUNQUEIRA, F. F. **Análise de comportamento de resíduos urbanos e sistemas drenofiltrantes em diferentes escalas, com referência ao aterro do Jôquei Clube**. Brasília, 2000. 283p. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

KROETZ, C. E. **Desenvolvimento de um sistema de apoio ao dimensionamento e estimativa de custos de aterros sanitários em trincheiras para municípios de pequeno porte**. Florianópolis, 2003. 159p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

LEITE, V. D.; WILTON, S. L.; BELLI FILHO, P.; PINTO, R. O.; CASTILHOS JR, A. B.; SOARES, H. M.; LIBÂNIO, P. A. C. **Bioestabilização de resíduos sólidos orgânicos**. In: Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. CASSINI, S. T. (Coordenador). Rio de Janeiro: ABES, RIMA, 2003. p.95-119.

LEITE, E. H. B. C.; MAHLER, C. F.; BRITO FILHO, L. F. **Avaliação do potencial de receitas derivadas do biogás de aterros**. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais... Campo Grande, 2005.

LIMA, L. M. Q. **Tratamento de lixo**. 2.ed. São Paulo: Hemus, 1991. 242p.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. Recife, 2003. 173p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil.

MANDELLI, S. M. C. **Tratamento de resíduos sólidos: compêndio de publicações**. Caxias do Sul, 1991.

MARIANO, O. H. M. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**. Recife, 2008. 232p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil.

MCBEAN, E. A.; ROVERS, F. A.; FARQUAR, G. J. **Solid waste landfill engineering and design**. Presentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ 07458, 1995. 521p.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **Status atual das atividades de projeto de MDL no Brasil e no mundo**. Disponível em: <[www.mct.gov.br/index.php/content/view/30317.html](http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/30317.html)> Acessado em setembro de 2008.

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

MILLS, I.; CVITAS, T.; HOMANN, K.; KALLAY, N. KUCHITSU, K. **Quantities, units and symbols in physical chemistry**. 2 ed. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1993. 165p.

MONTEIRO, V. E. D. **Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento do aterro da Muribeca**. Recife, 2003. GGp. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco.

OROFINO, F. V. G. **Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos de Florianópolis**. Florianópolis: COMCAP, 2002. 112p.

PALMISANO, A. C.; BARLAZ, M. A. **Microbiology of solid waste**. Boca Raton, Flórida, USA: CRC Press, 1996.

PROACTIVA MEIO AMBIENTE BRASIL. **Projeto de Captura e queima de gás de aterro sanitário de Tijuquinhas da Proactiva**. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: Documento de Concepção de Projeto. Janeiro, 2007.

QIAN, X. ; KOERNER, R. M.; GRAY, D. H. **Geotechnical aspects of landfill design and construction**. New Jersey: Presentice Hall, 2002. 717p.

SANTEC RESÍDUOS. Informações e dados técnicos obtidos junto a funcionário da empresa. Outubro, 2008.

SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO URBANO E MEIO AMBIENTE (SDM). **Diagnóstico do levantamento de dados dos resíduos sólidos nos municípios do estado, com revisão das diretrizes para a formulação da política estadual dos resíduos sólidos.** Florianópolis, outubro, 2001.

TANAKA, N. ; MATSUTO, T. ; LEE, H. S. **On-site survey of methane and carbon dioxide flux from MSW landfills in Japan.** In: Proceedings of the sixth international landfill symposium, Sardinia, vol.4, p.71-80, Itália, 1997.

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

TEIXEIRA, E. N. **Resíduos sólidos: minimização e reaproveitamento energético.** In: Seminário nacional sobre reuso/reciclagem de resíduos sólidos industriais. Anais... São Paulo: SEMA, 2000.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (USEPA). **Air emissions from municipal solid waste landfills – background information for proposed standards and guidelines.** Emissions Standards Division. EPA-450/3-90-011a. Março 1991.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (USEPA). **Emerging technologies for the management and utilization of landfill gas.** Office of Research and Development. EPA 68-D30035. Janeiro, 1998.

VANZIM, E. **Procedimento para análise da viabilidade econômica do uso do biogás de aterros sanitários para geração de energia elétrica: aplicação no aterro Santa Tecla.** Passo Fundo, 2006. 93p. Dissertação (Mestrado). Universidade de Passo Fundo, Faculdade de Engenharia e Arquitetura. Programa de Pós-Graduação em Engenharia.

ZAGO, S. **Potencialidade de produção de energia através do biogás integrada à melhoria ambiental em propriedades rurais com criação intensiva de animais, na região do Meio Oeste Catarinense.** Blumenau, 2003. 90p. Dissertação (Mestrado). Universidade Regional de Blumenau. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

## APÊNDICE A - DADOS ATERRO DE IÇARA

### A1. Vazão de biogás (Nm<sup>3</sup>/h).

Drenos	20/5	5/6	17/6	8/7	15/7	5/8	21/8	28/8
1	6,74	3,33	17,57	17,45	19,11	30,78	24,56	29,29
2	38,38	52,36	46,92	53,00	15,05	48,65	50,16	57,36
3	26,40	30,21	23,51	24,46	17,57	24,82	28,99	26,44
4	84,23	89,60	84,74	64,72	54,90	75,06	71,93	70,28
5	56,36	71,92	70,42	51,73	56,69	63,72	66,52	69,27
6	80,21	99,58	93,90	47,77	66,50	69,31	70,38	75,00
7	74,77	68,56	66,80	71,56	79,32	65,70	63,04	56,68
8	9,32	21,86	17,23	16,02	10,01	19,09	18,35	21,83
9	0,00	9,93	0,00	17,69	5,92	24,98	26,73	18,53
10	27,28	22,97	21,17	31,38	25,20	29,78	30,71	33,29
11	26,30	29,38	25,33	30,50	25,77	28,86	29,82	31,58
12	21,91	22,79	24,61	27,18	17,45	21,58	20,84	16,80
<b>Vazão Total</b>	<b>451,91</b>	<b>522,49</b>	<b>492,20</b>	<b>453,46</b>	<b>393,47</b>	<b>502,34</b>	<b>502,05</b>	<b>506,34</b>

### A2. Vazão de metano (Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/h).

Drenos	20/5	5/6	17/6	8/7	15/7	5/8	21/8	28/8
1	0,44	0,08	0,49	0,61	0,52	1,85	0,86	0,79
2	21,11	26,18	22,99	21,20	5,12	14,60	24,33	26,38
3	16,37	19,64	15,52	14,92	10,01	13,90	16,52	14,80
4	47,17	39,42	38,14	31,06	25,80	35,28	40,28	33,38
5	32,69	30,93	33,80	23,28	27,21	24,21	32,60	31,87
6	48,13	47,80	51,64	26,75	36,57	37,43	39,41	35,25
7	47,11	36,34	34,27	37,21	40,93	34,82	32,15	28,34
8	6,06	3,41	11,72	9,93	6,00	11,07	10,28	12,01
9	0,00	0,14	0,00	0,60	0,12	1,25	0,61	0,26
10	5,51	5,17	3,22	6,90	7,81	5,96	6,76	6,99
11	8,68	7,20	4,94	6,71	8,50	4,62	6,86	8,21
12	5,37	7,75	8,24	11,96	8,55	11,87	11,88	7,73
<b>Vazão Total</b>	<b>238,63</b>	<b>224,04</b>	<b>224,97</b>	<b>191,15</b>	<b>177,16</b>	<b>196,85</b>	<b>222,54</b>	<b>206,01</b>

**A3. Concentrações de CH<sub>4</sub> (%).**

<b>Drenos</b>	<b>20/5</b>	<b>5/6</b>	<b>17/6</b>	<b>8/7</b>	<b>15/7</b>	<b>5/8</b>	<b>21/8</b>	<b>28/8</b>
1	6,6	2,3	2,8	3,5	2,7	6,0	3,5	2,7
2	55,0	50,0	49,0	40,0	34,0	30,0	48,5	46,0
3	62,0	63,0	66,0	61,0	57,0	56,0	57,0	56,0
4	56,0	44,0	45,0	48,0	47,0	47,0	56,0	47,5
5	58,0	43,0	48,0	45,0	48,0	38,0	49,0	46,0
6	60,0	48,0	55,0	56,0	55,0	54,0	56,0	47,0
7	62,0	53,0	51,3	52,0	51,6	53,0	51,0	50,0
8	65,0	15,6	66,0	62,0	60,0	58,0	56,0	55,0
9	0,3	1,4	0,9	3,4	2,1	5,0	2,3	1,4
10	20,2	22,5	15,2	22,0	31,0	20,0	22,0	21,0
11	33,0	24,5	19,5	22,0	33,0	16,0	23,0	26,0
12	24,5	34,0	33,5	44,0	49,0	55,0	57,0	46,0
13	38,0	47,0	51,0	50,0	53,0	50,0	52,0	53,0
14	59,0	63,0	64,0	64,0	59,0	57,0	58,0	60,0
15	66,0	65,0	68,0	66,0	63,0	56,0	56,0	58,0

**A4. Concentrações de CO<sub>2</sub> (%).**

<b>Drenos</b>	<b>20/5</b>	<b>5/6</b>	<b>17/6</b>	<b>8/7</b>	<b>15/7</b>	<b>5/8</b>	<b>21/8</b>	<b>28/8</b>
1	12,4	3,8	3,8	4,4	4,2	3,2	4,8	2,6
2	44,0	45,0	43,0	34,0	32,0	25,0	27,0	30,0
3	36,0	37,0	33,0	39,0	41,0	41,0	42,0	44,0
4	44,0	38,0	38,0	43,0	42,0	39,0	45,0	47,0
5	42,0	37,0	41,0	53,0	52,0	36,0	45,0	39,0
6	39,0	40,0	42,0	42,0	45,0	45,0	41,0	37,0
7	37,0	42,0	40,0	42,0	44,0	40,0	40,0	34,0
8	32,0	17,0	34,0	37,0	41,0	42,0	40,0	40,0
9	0,0	3,0	0,6	2,2	3,6	3,8	4,2	1,6
10	18,0	20,0	13,5	22,0	26,0	25,0	19,0	19,0
11	26,0	21,5	18,0	27,0	30,0	13,5	22,5	25,0
12	31,0	31,0	31,0	43,0	41,0	40,0	42,0	33,0
13	22,5	40,0	42,0	42,0	43,0	41,0	40,0	38,0
14	39,0	38,0	37,0	36,0	39,0	40,0	43,0	41,0
15	34,0	36,0	33,0	33,0	37,0	39,0	42,0	42,0

**A5. Concentrações de O<sub>2</sub> (%).**

<b>Drenos</b>	<b>20/5</b>	<b>5/6</b>	<b>17/6</b>	<b>8/7</b>	<b>15/7</b>	<b>5/8</b>	<b>21/8</b>	<b>28/8</b>
1	16,8	18,4	17,5	16,6	17,8	18,9	18,0	19,0
2	1,0	3,7	4,1	6,0	8,1	9,6	9,8	5,0
3	1,0	0,9	0,7	0,2	0,0	0,5	0,4	0,6
4	1,6	7,3	5,2	3,4	2,0	6,3	0,8	1,0
5	1,1	6,2	4,0	1,6	0,0	6,0	0,8	4,0
6	2,6	4,3	2,5	1,7	0,1	2,4	0,4	3,0
7	1,6	1,7	4,2	3,3	2,5	6,2	1,4	6,0
8	0,2	12,2	1,0	0,4	0,3	0,5	1,5	0,8
9	18,2	18,7	19,3	18,9	17,8	15,4	18,1	19,8
10	12,4	11,7	14,1	10,2	9,5	11,3	12,0	11,5
11	10,6	10,8	12,0	10,0	7,4	15,0	9,0	7,0
12	7,3	6,9	6,6	2,9	0,6	0,4	0,6	5,0
13	2,2	2,5	1,1	0,9	0,2	0,1	0,4	0,4
14	1,0	0,9	0,7	0,6	0,3	0,2	0,2	0,8
15	0,8	0,9	0,8	0,4	0,3	0,3	0,4	0,8

**A6. Concentrações de H<sub>2</sub>S (ppm).**

<b>Drenos</b>	<b>20/5</b>	<b>5/6</b>	<b>17/6</b>	<b>8/7</b>	<b>15/7</b>	<b>5/8</b>	<b>21/8</b>	<b>28/8</b>
1	0	4	7	10	11	6	0	0
2	37	7	7	8	9	8	5	3
3	24	24	21	22	16	25	19	11
4	6	7	8	9	10	10	6	8
5	4	8	8	14	57	13	12	7
6	0	7	9	15	42	21	11	5
7	21	15	17	11	12	10	3	3
8	4	5	10	16	22	24	12	17
9	0	0	7	5	12	6	0	0
10	9	4	8	11	14	5	3	4
11	7	5	7	9	13	6	3	3
12	0	4	6	9	15	9	3	3
13	0	4	7	12	22	14	3	3
14	15	11	18	13	18	16	15	14
15	17	18	17	16	21	20	15	16



## APÊNDICE B - DADOS ATERRO DE TIJUQUINHAS

### **B1. Vazão de biogás - antes da extração forçada (Nm<sup>3</sup>/h).**

<b>Drenos</b>	<b>18/9/2008</b>	<b>2/10/2008</b>	<b>8/10/2008</b>
<b>Linha 1</b>			
1	71,20	75,41	67,83
2	190,57	209,66	175,74
3	52,92	47,53	24,86
4	196,01	225,14	158,61
5	59,36	48,91	21,03
6	245,90	228,11	168,17
7	128,61	135,69	104,71
8	29,50	34,86	26,84
9	146,26	215,87	135,79
10	0,00	0,00	0,00
11	11,46	0,00	36,11
12	8,19	7,47	8,30
13	58,43	51,69	49,50
14	14,82	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,00	0,00
17	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00
<b>Vazão L1</b>	<b>1213,23</b>	<b>1280,33</b>	<b>977,49</b>
<b>Linha 2</b>			
20	82,17	105,47	78,58
21	20,11	27,79	18,11
22	91,76	80,27	61,73
23	9,97	14,72	7,55
24	0,00	0,00	0,00
25	71,18	79,12	45,96
26	0,00	0,00	0,00
27	0,00	13,92	0,00
28	0,00	0,00	0,00
29	39,77	0,00	60,97
30	0,00	0,00	0,00
31	0,00	0,00	0,00
32	0,00	0,00	0,00
33	71,90	116,89	66,93
34	0,00	0,00	0,00
<b>Vazão L2</b>	<b>386,86</b>	<b>438,17</b>	<b>339,83</b>

**B2. Vazão de metano - antes da extração forçada (Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/h).**

<b>Drenos</b>	<b>18/9/2008</b>	<b>2/10/2008</b>	<b>8/10/2008</b>
<b>Linha 1</b>			
1	39,87	42,23	40,02
2	101,00	115,31	103,69
3	32,81	27,57	14,91
4	105,85	123,83	93,58
5	36,21	28,86	12,62
6	142,62	125,46	97,54
7	78,45	77,34	61,78
8	17,70	20,22	16,37
9	83,37	118,73	78,76
10	0,00	0,00	0,00
11	6,30	0,00	21,31
12	4,99	4,41	5,06
13	35,06	28,43	27,72
14	7,11	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,00	0,00
17	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00
<b>Vazão L1</b>	<b>691,35</b>	<b>712,38</b>	<b>573,36</b>
<b>Linha 2</b>			
20	47,66	59,06	46,36
21	11,66	15,84	10,68
22	53,22	44,95	35,81
23	5,58	8,09	4,15
24	0,00	0,00	0,00
25	41,29	45,10	27,12
26	0,00	0,00	0,00
27	0,00	7,80	0,00
28	0,00	0,00	0,00
29	23,07	0,00	35,36
30	0,00	0,00	0,00
31	0,00	0,00	0,00
32	0,00	0,00	0,00
33	42,42	67,80	39,49
34	0,00	0,00	0,00
<b>Vazão L2</b>	<b>224,90</b>	<b>248,63</b>	<b>198,97</b>

**B3. Vazão de biogás – com extração forçada (Nm<sup>3</sup>/h).**

<b>Drenos</b>	<b>6/11/2008</b>	<b>7/11/2008</b>	<b>13/11/2008</b>	<b>2/12/2008</b>	<b>3/12/2008</b>	<b>12/12/2008</b>
<b>Linha 1</b>						
1	0,00	4,59	0,00	0,00	0,00	0,00
2	246,55	234,15	202,40	221,13	203,06	205,16
3	36,15	23,33	26,91	29,71	22,81	27,40
4	203,94	193,62	184,65	198,58	190,94	182,02
5	36,12	35,02	23,23	30,95	21,69	22,10
6	175,68	176,75	185,81	194,44	183,85	186,35
7	145,46	147,26	116,00	93,97	99,46	86,26
8	30,78	30,81	24,62	23,26	20,72	21,60
9	189,21	179,30	185,05	181,99	178,13	168,48
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	58,93	61,18	54,25	66,11	67,25	76,01
12	11,67	6,91	5,34	7,71	5,22	5,04
13	134,10	125,45	130,79	57,26	47,79	74,78
14	0,00	0,00	0,00	2,81	0,00	0,00
15	168,23	176,74	119,11	123,65	136,54	146,85
16	7,84	7,14	8,50	6,36	6,70	6,34
17	30,82	32,81	30,57	12,64	11,93	6,34
18	18,01	19,55	59,23	6,45	3,89	0,00
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Vazão L1</b>	<b>1493,48</b>	<b>1454,62</b>	<b>1356,45</b>	<b>1257,04</b>	<b>1199,98</b>	<b>1214,73</b>
<b>Linha 2</b>						
20	42,18	49,28	45,31	22,91	91,95	92,65
21	17,27	19,10	23,46	30,35	22,26	22,38
22	68,20	66,09	56,59	158,68	125,97	127,06
23	0,00	5,08	4,48	11,36	13,18	13,30
24	46,33	43,57	48,40	64,42	53,69	54,19
25	35,89	45,95	24,96	127,12	125,71	126,75
26	44,66	49,06	49,35	67,56	53,56	54,06
27	23,22	22,94	32,35	57,97	58,57	58,98
28	19,55	15,83	25,42	33,10	25,77	25,99
29	63,08	58,21	70,14	86,02	79,73	80,40
30	17,81	14,20	24,60	28,52	20,64	20,84
31	64,13	63,81	75,50	74,26	64,96	65,46
32	14,66	10,57	20,86	29,65	23,17	23,40
33	52,85	54,03	52,95	105,24	99,61	100,28
34	24,91	20,58	25,25	29,62	28,33	28,56
<b>Vazão L2</b>	<b>534,72</b>	<b>538,28</b>	<b>579,62</b>	<b>926,75</b>	<b>887,09</b>	<b>894,31</b>

**B4. Vazão de metano - com extração forçada (Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/h).**

<b>Drenos</b>	<b>6/11/2008</b>	<b>7/11/2008</b>	<b>13/11/2008</b>	<b>2/12/2008</b>	<b>3/12/2008</b>	<b>12/12/2008</b>
<b>Linha 1</b>						
1	0,00	1,93	0,00	0,00	0,00	0,00
2	125,74	124,10	115,37	123,83	85,28	108,73
3	19,16	12,60	13,99	13,97	5,36	12,60
4	114,21	106,49	103,40	109,22	95,47	103,75
5	16,61	17,86	13,24	17,64	8,03	12,37
6	96,62	98,98	105,91	106,94	93,76	104,36
7	81,46	80,99	66,12	53,56	41,77	49,17
8	17,55	17,87	14,52	13,49	7,67	12,74
9	105,96	100,41	101,78	100,10	96,19	94,35
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	31,23	32,43	30,38	36,36	29,59	36,48
12	5,13	4,01	3,10	4,47	2,14	2,62
13	7,51	70,25	73,24	31,49	21,98	27,67
14	0,00	0,00	0,00	1,24	0,00	0,00
15	94,21	98,97	66,70	68,01	76,46	83,70
16	3,21	3,71	4,84	3,63	3,82	3,62
17	18,49	19,69	18,03	7,46	7,16	3,81
18	9,55	10,56	34,35	2,84	1,24	0,00
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Vazão L1</b>	<b>746,64</b>	<b>800,85</b>	<b>764,99</b>	<b>694,25</b>	<b>575,93</b>	<b>655,98</b>
<b>Linha 2</b>						
20	24,04	27,59	25,83	12,83	51,49	51,89
21	9,85	10,89	13,37	16,39	12,24	12,09
22	38,19	37,01	32,26	88,86	70,54	71,15
23	0,00	2,79	2,55	4,43	6,85	6,92
24	25,94	24,40	27,59	35,43	28,99	29,80
25	19,74	25,73	14,23	68,64	66,62	68,45
26	25,45	27,47	28,13	37,83	30,00	30,28
27	13,00	12,85	19,09	30,14	31,04	31,85
28	10,75	8,70	14,23	16,55	13,14	13,77
29	35,95	29,10	39,98	45,59	43,85	44,22
30	9,44	7,10	14,27	14,83	11,15	11,25
31	36,55	35,73	43,79	42,33	37,03	36,66
32	8,35	6,02	11,89	14,53	11,82	11,93
33	30,12	30,80	30,71	53,67	51,80	52,14
34	13,95	11,52	13,89	15,40	14,73	14,85
<b>Vazão L2</b>	<b>301,34</b>	<b>297,72</b>	<b>331,80</b>	<b>497,45</b>	<b>481,29</b>	<b>487,25</b>

**B5. Concentrações de CH<sub>4</sub> (%) antes da extração forçada.**

<b>Drenos</b>	<b>18/9/2008</b>	<b>2/10/2008</b>	<b>8/10/2008</b>
<b>Linha 1</b>			
1	56,0	56,0	59,0
2	53,0	55,0	59,0
3	62,0	58,0	60,0
4	54,0	55,0	59,0
5	61,0	59,0	60,0
6	58,0	55,0	58,0
7	61,0	57,0	59,0
8	60,0	58,0	61,0
9	57,0	55,0	58,0
10	-	-	-
11	55,0	-	59,0
12	61,0	59,0	61,0
13	60,0	55,0	56,0
14	48,0	-	-
15	-	-	-
16	-	-	-
17	-	-	-
18	-	-	-
19	-	-	-
<b>Linha 2</b>			
20	58,0	56,0	59,0
21	58,0	57,0	59,0
22	58,0	56,0	58,0
23	56,0	55,0	55,0
24	-	-	-
25	58,0	57,0	59,0
26	-	-	-
27	-	56,0	-
28	-	-	-
29	58,0	-	58,0
30	-	-	-
31	-	-	-
32	-	-	-
33	59,0	58,0	59,0
34	-	-	-

**B6. Concentrações de CO<sub>2</sub> (%) antes da extração forçada.**

<b>Drenos</b>	<b>18/9/2008</b>	<b>2/10/2008</b>	<b>8/10/2008</b>
<b>Linha 1</b>			
1	45,0	43,0	42,0
2	46,0	44,0	42,0
3	39,0	41,0	41,0
4	49,0	45,0	42,0
5	43,0	41,0	38,0
6	43,0	45,0	43,0
7	40,0	43,0	40,0
8	40,0	40,0	40,0
9	42,0	45,0	41,0
10	-	-	-
11	40,0	-	43,0
12	40,0	40,0	41,0
13	39,0	43,0	42,0
14	34,0	-	-
15	-	-	-
16	-	-	-
17	-	-	-
18	-	-	-
19	-	-	-
<b>Linha 2</b>			
20	43,0	44,0	42,0
21	41,0	43,0	41,0
22	43,0	43,0	43,0
23	45,0	45,0	44,0
24	-	-	-
25	44,0	43,0	41,0
26	-	-	-
27	-	44,0	-
28	-	-	-
29	43,0	-	41,0
30	-	-	-
31	-	-	-
32	-	-	-
33	42,0	43,0	41,0
34	-	-	-

**B7. Concentrações de O<sub>2</sub> (%) antes da extração forçada.**

<b>Drenos</b>	<b>18/9/2008</b>	<b>2/10/2008</b>	<b>8/10/2008</b>
<b>Linha 1</b>			
1	0,2	0,5	0,5
2	0,0	0,1	0,6
3	0,4	0,4	0,6
4	0,2	0,3	0,5
5	0,3	0,4	0,6
6	0,2	0,4	0,6
7	0,3	0,4	0,6
8	0,3	0,5	0,6
9	0,3	0,4	0,7
10	-	-	-
11	1,0	-	0,6
12	0,5	0,5	0,7
13	0,5	0,7	0,6
14	5,5	-	-
15	-	-	-
16	-	-	-
17	-	-	-
18	-	-	-
19	-	-	-
<b>Linha 2</b>			
20	0,5	0,5	0,5
21	0,5	0,4	0,6
22	0,3	0,3	0,6
23	0,8	0,6	1,2
24	-	-	-
25	0,5	0,4	0,5
26	-	-	-
27	-	0,4	-
28	-	-	-
29	0,4	-	0,7
30	-	-	-
31	-	-	-
32	-	-	-
33	0,5	0,4	0,6
34	-	-	-

**B8. Concentrações de H<sub>2</sub>S (ppm) antes da extração forçada.**

<b>Drenos</b>	<b>18/9/2008</b>	<b>2/10/2008</b>	<b>8/10/2008</b>
<b>Linha 1</b>			
1	64,0	45,0	34,0
2	68,0	47,0	24,0
3	21,0	27,0	19,0
4	56,0	43,0	32,0
5	18,0	25,0	15,0
6	38,0	29,0	27,0
7	19,0	25,0	13,0
8	20,0	22,0	12,0
9	32,0	31,0	19,0
10	-	-	-
11	33,0	-	24,0
12	21,0	23,0	14,0
13	10,0	7,0	9,0
14	14,0	-	-
15	-	-	-
16	-	-	-
17	-	-	-
18	-	-	-
19	-	-	-
<b>Linha 2</b>			
20	17,0	21,0	26,0
21	18,0	31,0	25,0
22	24,0	22,0	26,0
23	17,0	47,0	14,0
24	-	-	-
25	22,0	28,0	20,0
26	-	-	-
27	-	26,0	-
28	-	-	-
29	29,0	-	29,0
30	-	-	-
31	-	-	-
32	-	-	-
33	22,0	26,0	22,0
34	-	-	-



**B9. Concentrações de CH<sub>4</sub> (%) com extração forçada.**

<b>Drenos</b>	<b>6/11/2008</b>	<b>7/11/2008</b>	<b>13/11/2008</b>	<b>2/12/2008</b>	<b>3/12/2008</b>	<b>12/12/2008</b>
<b>Linha 1</b>						
1	-	42,0	-	-	-	-
2	51,0	53,0	57,0	56,0	42,0	53,0
3	53,0	54,0	52,0	47,0	23,5	46,0
4	56,0	55,0	56,0	55,0	50,0	57,0
5	46,0	51,0	57,0	57,0	37,0	56,0
6	55,0	56,0	57,0	55,0	51,0	56,0
7	56,0	55,0	57,0	57,0	42,0	57,0
8	57,0	58,0	59,0	58,0	37,0	59,0
9	56,0	56,0	55,0	55,0	54,0	56,0
10	-	-	-	-	-	-
11	53,0	53,0	56,0	55,0	44,0	48,0
12	44,0	58,0	58,0	58,0	41,0	52,0
13	5,6	56,0	56,0	55,0	46,0	37,0
14	-	-	-	44,0	-	-
15	56,0	56,0	56,0	55,0	56,0	57,0
16	41,0	52,0	57,0	57,0	57,0	57,0
17	60,0	60,0	59,0	59,0	60,0	60,0
18	53,0	54,0	58,0	44,0	32,0	-
19	-	-	-	-	-	-
<b>Linha 2</b>						
20	57,0	56,0	57,0	56,0	56,0	56,0
21	57,0	57,0	57,0	54,0	55,0	54,0
22	56,0	56,0	57,0	56,0	56,0	56,0
23	-	55,0	57,0	39,0	52,0	52,0
24	56,0	56,0	57,0	55,0	54,0	55,0
25	55,0	56,0	57,0	54,0	53,0	54,0
26	57,0	56,0	57,0	56,0	56,0	56,0
27	56,0	56,0	59,0	52,0	53,0	54,0
28	55,0	55,0	56,0	50,0	51,0	53,0
29	57,0	50,0	57,0	53,0	55,0	55,0
30	53,0	50,0	58,0	52,0	54,0	54,0
31	57,0	56,0	58,0	57,0	57,0	56,0
32	57,0	57,0	57,0	49,0	51,0	51,0
33	57,0	57,0	58,0	51,0	52,0	52,0
34	56,0	56,0	55,0	52,0	52,0	52,0

**B10. Concentrações de CO<sub>2</sub> (%) com extração forçada.**

<b>Drenos</b>	<b>6/11/2008</b>	<b>7/11/2008</b>	<b>13/11/2008</b>	<b>2/12/2008</b>	<b>3/12/2008</b>	<b>12/12/2008</b>
<b>Linha 1</b>						
1	-	33,0	-	-	-	-
2	41,0	42,0	43,0	43,0	34,0	43,0
3	39,0	42,0	41,0	41,0	21,0	40,0
4	44,0	44,0	43,0	44,0	40,0	42,0
5	41,0	42,0	42,0	43,0	29,0	42,0
6	44,0	43,0	46,0	44,0	42,0	43,0
7	43,0	42,0	43,0	42,0	33,0	42,0
8	41,0	41,0	41,0	41,0	27,0	40,0
9	43,0	43,0	44,0	44,0	43,0	43,0
10	-	-	-	-	-	-
11	44,0	43,0	43,0	44,0	35,0	40,0
12	32,0	41,0	41,0	41,0	29,0	38,0
13	4,4	43,0	42,0	44,0	37,0	32,0
14	-	-	-	35,0	-	-
15	44,0	44,0	43,0	44,0	44,0	42,0
16	34,0	40,0	42,0	42,0	42,0	42,0
17	40,0	40,0	39,0	40,0	39,0	39,0
18	47,0	45,0	43,0	31,0	23,0	-
19	-	-	-	-	-	-
<b>Linha 2</b>						
20	43,0	44,0	43,0	43,0	43,0	43,0
21	42,0	44,0	42,0	44,0	44,0	44,0
22	44,0	44,0	43,0	43,0	44,0	43,0
23	-	44,0	42,0	33,0	42,0	42,0
24	43,0	43,0	44,0	44,0	43,0	43,0
25	43,0	43,0	42,0	44,0	43,0	43,0
26	43,0	44,0	43,0	44,0	44,0	44,0
27	43,0	43,0	42,0	43,0	44,0	44,0
28	43,0	44,0	43,0	43,0	43,0	43,0
29	40,0	40,0	43,0	43,0	44,0	44,0
30	42,0	40,0	42,0	44,0	45,0	45,0
31	42,0	43,0	41,0	42,0	42,0	43,0
32	42,0	42,0	43,0	42,0	43,0	43,0
33	42,0	42,0	42,0	40,0	40,0	40,0
34	43,0	43,0	42,0	43,0	42,0	42,0

**B11. Concentrações de O<sub>2</sub> (%) com extração forçada.**

<b>Drenos</b>	<b>6/11/2008</b>	<b>7/11/2008</b>	<b>13/11/2008</b>	<b>2/12/2008</b>	<b>3/12/2008</b>	<b>12/12/2008</b>
<b>Linha 1</b>						
1	-	5,7	-	-	-	-
2	2,2	1,8	0,6	0,6	5,6	1,1
3	1,6	0,9	1,1	0,8	10,6	1,4
4	0,3	0,3	0,9	0,8	3,0	0,5
5	0,5	0,4	0,6	0,6	7,6	1,3
6	0,4	0,4	0,6	0,5	2,5	0,7
7	0,6	1,1	0,9	0,6	5,7	0,7
8	1,0	0,6	0,6	0,6	7,8	0,6
9	0,4	0,5	0,9	0,7	1,7	0,6
10	-	-	-	-	-	-
11	1,8	0,7	0,6	0,6	4,5	3,1
12	5,0	0,6	0,1	1,0	5,9	3,2
13	0,5	0,4	0,7	0,7	4,0	7,4
14	-	-	-	4,7	-	-
15	0,5	0,4	0,8	0,2	0,1	0,7
16	5,9	2,0	0,9	0,5	0,7	0,7
17	0,3	0,3	1,0	0,6	0,9	1,2
18	0,0	0,1	0,0	5,8	1,0	-
19	-	-	-	-	-	-
<b>Linha 2</b>						
20	0,4	0,4	0,6	0,6	0,7	0,7
21	0,4	0,4	0,6	1,0	0,8	0,8
22	0,4	0,4	0,6	1,0	0,6	0,6
23	-	0,3	0,5	5,2	1,7	2,3
24	0,5	0,5	0,5	0,9	0,7	0,7
25	0,6	0,5	0,5	0,7	1,2	1,2
26	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5
27	0,4	0,4	0,4	1,4	1,1	1,1
28	0,4	0,4	0,4	1,3	0,9	0,9
29	0,5	0,6	0,5	1,6	0,6	0,5
30	0,4	0,4	0,5	0,6	0,4	0,4
31	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
32	0,4	0,4	0,5	1,1	0,7	0,7
33	0,5	0,5	0,6	1,1	0,8	0,8
34	0,5	0,8	0,2	1,0	0,7	0,7

**B12. Concentrações de H<sub>2</sub>S (ppm) com extração forçada.**

<b>Drenos</b>	<b>6/11/2008</b>	<b>7/11/2008</b>	<b>13/11/2008</b>	<b>2/12/2008</b>	<b>3/12/2008</b>	<b>12/12/2008</b>
<b>Linha 1</b>						
1	-	5,0	-	-	-	-
2	26,0	24,0	20,0	24,0	22,0	18,0
3	10,0	17,0	11,0	13,0	12,0	8,0
4	35,0	35,0	25,0	33,0	31,0	25,0
5	7,0	13,0	9,0	18,0	13,0	13,0
6	30,0	31,0	25,0	26,0	30,0	24,0
7	21,0	24,0	16,0	14,0	16,0	16,0
8	17,0	23,0	11,0	19,0	13,0	11,0
9	20,0	33,0	18,0	22,0	23,0	16,0
10	-	-	-	-	-	-
11	4,0	17,0	18,0	28,0	19,0	3,0
12	12,0	30,0	16,0	22,0	15,0	11,0
13	11,0	23,0	14,0	13,0	11,0	0,0
14	-	-	-	27,0	-	-
15	26,0	42,0	18,0	39,0	40,0	24,0
16	25,0	46,0	26,0	38,0	26,0	26,0
17	25,0	41,0	21,0	49,0	33,0	29,0
18	43,0	68,0	84,0	32,0	24,0	-
19	-	-	-	-	-	-
<b>Linha 2</b>						
20	25,0	28,0	21,0	18,0	20,0	20,0
21	24,0	28,0	23,0	9,0	1,5	3,0
22	29,0	30,0	31,0	25,0	2,5	10,0
23	-	29,0	26,0	3,0	8,0	6,0
24	30,0	34,0	29,0	3,0	4,0	4,0
25	25,0	24,0	25,0	2,0	3,0	3,0
26	27,0	35,0	28,0	4,0	8,0	7,0
27	43,0	45,0	39,0	4,0	7,0	7,0
28	30,0	31,0	31,0	2,0	5,0	5,0
29	34,0	33,0	34,0	4,0	11,0	8,0
30	32,0	30,0	28,0	4,0	18,0	12,0
31	39,0	40,0	37,0	28,0	37,0	30,0
32	23,0	26,0	26,0	2,0	3,0	3,0
33	17,0	19,0	19,0	2,0	3,0	3,0
34	23,0	21,0	20,0	3,0	14,0	10,0