

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**EMIÇÃO DE METANO NAS LAGOAS DE
DECANTAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE ESGOTOS DE JUNDIAÍ**

ANTONIO CARLOS DOS SANTOS

**Campinas
2010**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**EMISSÃO DE METANO NAS LAGOAS DE
DECANTAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE ESGOTOS DE JUNDIAÍ**

ANTONIO CARLOS DOS SANTOS

ORIENTADOR: PROF. DR. EDSON APARECIDO ABDUL NOUR

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. PEDRO SÉRGIO FADINI

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Saneamento e Ambiente.

**Campinas
2010**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Sa59e Santos, Antonio Carlos dos
Emissão de metano nas lagoas de decantação da
estação de tratamento de esgotos de Jundiaí / Antonio
Carlos dos Santos. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientadores: Edson Aparecido Abdul Nour, Pedro
Sérgio Fadini.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

1. Metano. 2. Efeito estufa. 3. Aquecimento global.
4. Esgotos sanitários. 5. Biogás. I. Nour, Edson
Aparecido Abdul. II. Fadini, Pedro Sérgio. III.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Título em Inglês: Methane emission from decantation lagoons in Jundiaí
wastewater treatment plant

Palavras-chave em Inglês: Methane, Greenhouse effect, Global warming,
Domestic wastewater, Biogas

Área de concentração: Saneamento e Ambiente

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: José Roberto Guimarães, Roberto Alves de Oliveira

Data da defesa: 26/08/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – UNICAMP

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**EMIÇÃO DE METANO NAS LAGOAS DE
DECANTAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE ESGOTOS DE JUNDIAÍ**

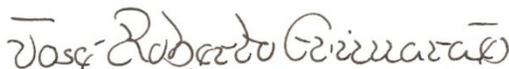
ANTONIO CARLOS DOS SANTOS

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



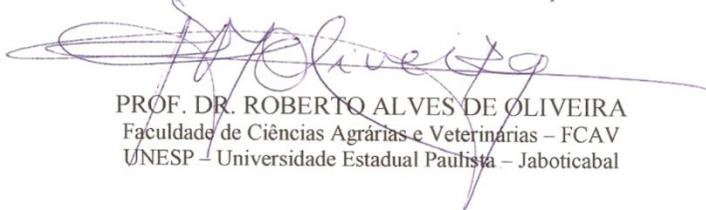
PROF. DR. EDSON APARECIDO ABDUL NOUR

Presidente e Orientador – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo –
UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas



PROF. DR. JOSÉ ROBERTO GUIMARÃES

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas



PROF. DR. ROBERTO ALVES DE OLIVEIRA

Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV
UNESP – Universidade Estadual Paulista – Jaboticabal

Campinas, agosto de 2.010

*À Deus,
AGRADEÇO.*

*À minha querida esposa, Adriana e às
minhas princesinhas, Brenda e Bárbara,
pela paciência, pelo incentivo e por
acreditarem neste trabalho, DEDICO.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Edson Aparecido Abdul Nour, primeiramente pela orientação, a qual foi “norteando” este trabalho, mas sem nunca esquecer o apoio, a amizade e a confiança na conclusão deste mestrado.

Ao Professor Doutor Pedro Sérgio Fadini, pela amizade, que surgiu antes dos trabalhos, pela disposição permanente em ajudar e pelas sugestões apresentadas como co-orientador, incluindo as críticas necessárias na banca da qualificação, tornando esta dissertação mais “amadurecida”.

Ao Professor Doutor José Roberto Guimarães, por aceitar compor a banca durante o exame de qualificação e por suas sugestões e críticas lá apresentadas, as quais me ensinaram, entre outros assuntos, que um bom trabalho começa nos pequenos detalhes e, também, por compor a banca examinadora na defesa final.

Ao Professor Doutor Roberto Alves de Oliveira, que mesmo com uma agenda repleta de atividades, se dispôs a deslocar-se de Jaboticabal à Campinas, para compor a banca examinadora na defesa final deste trabalho e contribuir com sua experiência.

Ao conselho diretor da Companhia Saneamento de Jundiaí, por permitir o desenvolvimento deste trabalho, disponibilizando a Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí para a realização da parte prática, bem como o auxílio financeiro no desenvolvimento desta.

Ao diretor da Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí, Engenheiro Luiz Pannuti Carra que além do apoio necessário, esteve sempre disposto a ajudar com novas idéias para superação dos obstáculos encontrados durante o desenvolvimento da parte

prática, bem como ter disponibilizado o auxílio financeiro necessário e por ter autorizado a minha ausência nos momentos necessários.

Ao Programa de Pós-graduação do Departamento de Saneamento e Ambiente, pela infra-estrutura oferecida.

Aos colaboradores da Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí, Rafael, Sidney, Odair, José Renato, Adilson, Benedito (Macarrão), João Márcio, Agnes, Tatiane, Jaqueline, Juliana, Rosenildo, José Augusto, Rivaldo, Damião da Paz, Manuel, Thiago e Daniel, pelas diversas contribuições desde o manuseio do barco, análises laboratoriais, levantamento dos dados, até a construção e adaptação dos equipamentos para captação do biogás.

À Professora Doutora Emília W. Rutkouski que durante a sua matéria apresentada no curso, mudou o meu olhar com relação à gestão ambiental, para uma visão mais global e, ainda, transmitiu importantes experiências na elaboração, redação e postura para a conclusão deste trabalho.

Ao Professor Doutor Philip Fearnside pelas sugestões apresentadas em uma etapa importante deste trabalho e pelos vários artigos disponibilizados.

Aos professores doutores, Marcelo Zaiat e Maria Bernadete, da Universidade de São Paulo, unidade de São Carlos e ao professor doutor Edson L. Silva da Universidade Federal de São Carlos, pela presteza quando consultados durante a realização da parte prática.

À minha esposa Adriana, minhas filhas Brenda e Bárbara e minha sogra Marina que entenderam e proporcionaram condições para que por diversos finais de semana eu pudesse me recolher para os livros.

Aos meus pais Antonio e Ignez porque durante a minha formação sempre priorizarem as condições necessárias para o melhor aproveitamento dos estudos, formação profissional e formação do caráter.

E a todos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

Marco Polo descreve uma ponte, pedra por pedra.

— Mas qual é a pedra que sustenta a ponte? — pergunta Kublai Khan.

— A ponte não é sustentada por esta ou aquela pedra — responde Marco —, mas pela curva do arco que estas formam.

Kublai Khan permanece em silêncio, refletindo. Depois acrescenta:

— Por que falar das pedras? Só o arco me interessa.

Polo responde:

— Sem as pedras o arco não existe.

(Passagem do livro “As cidades invisíveis” de Ítalo Calvino¹ – página 79)

¹ Calvino, Italo. As Cidades Invisíveis. 1aed. [Le città invisibili, 1972]. Tradução: Diogo Mainardi. Companhia das Letras, p. 79, 1990.

RESUMO

SANTOS, A.C. Emissão de Metano nas Lagoas de Decantação da Estação de Tratamento de Esgotos de Jundiaí. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2010. 153 páginas. Dissertação de Mestrado.

No presente trabalho foi verificada a contribuição nas emissões de metano para a atmosfera da Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí, em duas campanhas de coletas em suas lagoas de decantação, com as amostragens sendo realizadas em pontos próximos à entrada e à saída das lagoas. Utilizou-se um coletor de gás semelhante ao concentrador de gás interno do reator UASB, a técnica da câmara estática para amostragem dos fluxos totais e a câmara estática adaptada para a coleta dos fluxos difusivos, na qual foi instalado um anteparo para impedir a coleta dos fluxos ebulitivos. Para a análise dos fluxos foram medidas as variáveis ambientais, pressão e temperatura. Os fluxos foram medidos e divididos por tipo: difusivos (liberados para a atmosfera por meio da difusão mássica) e ebulitivos (liberados para a atmosfera por meio de bolhas). O fluxo ebulitivo representou cerca de 95% da liberação total de metano para a atmosfera, e um valor médio de $9.008 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2 \text{ d}$. O fluxo difusivo teve valor médio de $421 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2 \text{ d}$. Devido a pouca variação nas temperaturas não foi possível verificar a sua correlação com os fluxos de metano. Porém com a altura do manto de lodo no interior das lagoas a correlação foi direta. Na estimativa do potencial energético do metano, os $471 \text{ kg CH}_4/\text{d}$ que poderiam ser recuperados, gerariam até 196 MWh/mês de energia elétrica, desconsiderando-se as perdas do sistema. Considerando-se o fluxo total médio e a área total das quatro lagoas de decantação, a emissão anual de metano foi de 264 Mg CH_4 . Estas estimativas ainda conservam uma incerteza devido às extrapolações das medidas realizadas.

Palavras Chaves: Fluxo de Metano, Fluxo Ebulitivo, Fluxo Difusivo, Efeito Estufa, Aquecimento Global, Esgoto Sanitário Doméstico.

ABSTRACT

SANTOS, A.C. Methane Emission from Decantation Lagoons in Jundiaí Wastewater Treatment Plant. Campinas, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Urbanism, State University of Campinas, 2010. 153 pages. Master Degree Dissertation.

In the present work was estimated the contribution of methane emission to the global atmosphere. In this study were realized two campaigns of collections in the settling ponds n.º03 (2008) and n.º04 (2010) with sampling operation being carried out in points coming into and out of the lagoons. A gas collector has been utilized as the UASB inner gas keeper and the static chamber technique to samples of the total flux, that chamber was adapted to collect diffusive flux in which was settled a screen to prevent bubble flux. To the flux analyses were measured some environmental variable mainly the temperature, and divided by type: diffusive (released to the atmosphere through the massive diffusion) and bubble (released to the atmosphere through bubble). The bubble flux submitted about 95% of the total methane liberation to the atmosphere and submitted an average value of 9.008 mgCH₄/m².day. The diffusive flux submitted an average value of 421 mgCH₄/m².day. Due of a little variation in the temperature it was not possible to verify the co-relation between methane flux with the temperatures. In spite of the height backlog of sludge in the deep of collection the direct co-relation was obtained. In the energetic potential of methane was estimated 471 kgCH₄/day that could be recovered, would generate until 196 MWh/month of energy ignoring the system loss. Considering the average total flux of total area of the collection decantation lagoons, the annual emission of methane was 264 MgCH₄ (Mega grams of methane). Those estimates still retain an uncertainty due extrapolations of the measures carried out.

Keywords: Methane Flux, Bubble Flux, Diffusive Flux, Greenhouse Gases, Global Warming, Domestic Wastewater.

SUMÁRIO

RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
LISTA DE FIGURAS	xvii
LISTA DE TABELAS	xxi
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xxv
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo Geral	3
2.2. Objetivos Específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. Desenvolvimento Sustentável	5
3.2. Controle dos Poluentes da Atmosfera Terrestre	7
3.3. O Efeito Estufa e o Aquecimento Global	9
3.4. Fontes e Sumidouros de Metano	12
3.5. O Tratamento de Esgoto	18
3.6. Fundamentos da Digestão Anaeróbia	19
3.7. Cromatografia a Gás	21
3.8. Transferência de Massa	23
3.8.1. Leis de Equilíbrio Entre Fases	25
3.8.2. Difusão (Leis de Fick)	25
3.8.3. Convecção Mássica	27
3.9. Lagoas de Estabilização	29
3.10. Poder Calorífico	31

4.	MATERIAL E MÉTODOS.....	33
4.1.	Local do Desenvolvimento do Estudo.....	33
4.2.	Descrição do Sistema de Tratamento.....	36
4.3.	Seleção das Unidades a serem Monitoradas.....	43
4.4.	Determinação do Manto de Lodo no Interior das Lagoas de Decantação.....	44
4.5.	Coleta das Amostras de Biogás.....	47
4.5.1.	Primeira Campanha de Amostragem do Biogás.....	47
4.5.2.	Segunda Campanha de Amostragem do Biogás.....	52
4.5.3.	Adaptação da Câmara Estática para Coleta Somente do Fluxo Difusivo.....	55
4.6.	Localização dos Pontos de Batimetria e de Amostragem nas Lagoas.....	56
4.7.	Análises das Amostras – Cromatografia Gasosa.....	57
4.8.	Variáveis Estudadas.....	58
4.9.	Determinação dos Fluxos de Metano.....	59
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
5.1.	Introdução.....	63
5.2.	Determinação das Concentrações do Metano nas Amostras Coletadas.....	64
5.2.1.	Concentrações Determinadas pelo Laboratório TASQA.....	64
5.2.2.	Concentrações Determinadas pelo Laboratório ACQUALAB.....	65
5.3.	Determinação dos Fluxos de Metano a Partir das Amostras Coletadas.....	68
5.4.	Análise dos Fluxos de Metano Medidos.....	71
5.4.1.	Comparativo dos Fluxos de Metano Medidos com os Fluxos Encontrados em Outros Trabalhos.....	77
5.5.	Influência da Temperatura nos Fluxos de Metano.....	80
5.6.	Influência da Pressão Atmosférica nos Fluxos de Metano.....	81
5.7.	Influência do Manto de Lodo nos Fluxos de Metano.....	81
5.7.1.	Análise da Altura do Manto de Lodo na Lagoa de Decantação n.º03.....	82
5.7.2.	Análise da Altura do Manto de Lodo na Lagoa de Decantação n.º04.....	83
5.7.3.	Verificação do Fluxo de Metano e a Altura do Manto de Lodo no Ponto de Amostragem.....	90
5.8.	Estimativa de Emissão de Metano para a ETE Jundiaí.....	92
5.9.	Estimativa do Potencial de Produção de Energia a partir do Metano.....	95

6. CONCLUSÕES.....	99
7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	103
ANEXOS.....	105
ANEXO A – Variáveis ambientais e tempos das amostragens.....	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115
APÊNDICES.....	123
Apêndice A – Memória de cálculo dos fluxos (ebulitivos) de metano nas amostras do coletor de biogás.....	124
Apêndice B – Memória de cálculo dos fluxos (ebulitivos e/ou difusivos) de metano nas amostras da câmara estática por variação da concentração (final – inicial).....	125

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1: Concentrações atmosféricas de dióxido de carbono e metano ao longo dos últimos 10.000 anos (painéis grandes) e desde 1750 (painéis pequenos). As medições foram obtidas a partir de testemunhos de gelo (símbolos com diferentes cores para diferentes estudos) e amostras atmosféricas (linhas vermelhas). Os forçamentos radiativos correspondentes são mostrados nos eixos do lado direito dos painéis grandes.....	11
FIGURA 3.2: Contribuição de fontes individuais para emissões naturais de metano.	13
FIGURA 3.3: Contribuição de fontes individuais para emissões antropogênicas de metano.	14
FIGURA 3.4: Diagrama de bloco de um cromatógrafo genérico.....	22
FIGURA 3.5: O Fenômeno da Transferência de Massa.....	24
FIGURA 4.1: Localização da ETEJ.	33
FIGURA 4.2: Vista aérea da ETEJ. Pontos: (1) Entrada/Elevatória; (2) Desarenadores; (3) e (4) Lagoas de aeração 01 e 02, respectivamente; (5) Sopradores; (6) à (9) Lagoas de decantação de 01 à 04, respectivamente; (10) Saída/Rio Jundiaí; (11) Desidratação do lodo; (12) Estufas de lodo; (13) e (14) Lagoa de aeração 03 e Lagoa de decantação 05, respectivamente – em construção.	34
FIGURA 4.3: Fluxograma da ETEJ.	35
FIGURA 4.4: Gradeamento grosso.	36
FIGURA 4.5: Gradeamento fino. Pontos: (1) grade mecanizada 01; (2) grade mecanizada 02; (3) correia transportadora dos resíduos para a caçamba.....	37
FIGURA 4.6: Estação elevatória de esgoto e ao fundo, em vermelho a subestação elétrica exclusiva da elevatória.....	37
FIGURA 4.7: Desarenadores.....	38
FIGURA 4.8: Lagoa de aeração n.º01.....	39
FIGURA 4.9: Lagoas de decantação n.º03 (em primeiro plano) e n.º04.....	39
FIGURA 4.10: Efluente final.	40

FIGURA 4.11: Galpão de desidratação do lodo.....	41
FIGURA 4.12: Picador de madeira, utilizado para picar poda de árvores ou casca de eucalipto.	41
FIGURA 4.13: Estufas para armazenamento do lodo compostado.....	41
FIGURA 4.14: Perfil das lagoas de decantação n.º03 e n.º04, sem escala, com as medidas em metros, cortes longitudinal e transversal, sendo a profundidade de 4,5 m, a largura de 91,0 m e o comprimento de 211,0 m, ambos medidos na superfície da água.	43
FIGURA 4.15: Disco de Secchi.	45
FIGURA 4.16: Representação gráfica do resultado médio das 3 colunas para cada linha da batimetria, relativo ao manto de lodo das lagoas de decantação n.º03 e n.º04. A linha 1 está localizada próxima a entrada da lagoa e a linha 10 próxima a saída.....	46
FIGURA 4.17: “Bag” para armazenamento das amostras de gás.	47
FIGURA 4.18: Coletor de biogás.	48
FIGURA 4.19: Detalhe do tubo de passagem do gás montado no coletor de gás.....	49
FIGURA 4.20: Posicionamento do coletor de gás, com o “bag”acoplado para início de amostragem.....	49
FIGURA 4.21: Medição das variáveis tempo e volume para auxílio no cálculo do fluxo de biogás.....	51
FIGURA 4.22: Dimensões do coletor de biogás, com todas medidas em milímetros.	51
FIGURA 4.23: Câmara estática.....	52
FIGURA 4.24: Seringa para retirada da amostra do interior da câmara.	53
FIGURA 4.25: Posicionamento da câmara para início de amostragem.....	53
FIGURA 4.26: Dimensões da câmara estática, com as medidas em milímetros.	54
FIGURA 4.27: Vista de topo da instalação do anteparo na câmara.	55
FIGURA 4.28: Câmara adaptada.....	55
FIGURA 4.29: Pontos de batimetria e coleta do biogás na lagoa de decantação n.º03.	56
FIGURA 4.30: Pontos de batimetria na lagoa de decantação n.º04. As coordenadas “Cx” por “Lx” serão utilizadas para definir os pontos de amostragem, porque os mesmos variaram durante a segunda campanha.	56
FIGURA 4.31: Diagrama do DIC – Detector de Ionização de Chama.	57
FIGURA 4.32: Cromatógrafo 6820 GC System – Agilent Technologies.....	58
FIGURA 5.1: Variação temporal da concentração medida no interior da cúpula para (a) fluxos difusivos e (b) fluxos ebulitivos.	72
FIGURA 5.2: Funil coletor de bolhas em sub-superfície.....	73
FIGURA 5.3: Câmaras de difusão acopladas a bóias.....	74
FIGURA 5.4: Fluxo ebulitivo e temperatura em cada amostragem. No eixo Y da esquerda se tem o fluxo de metano ebulitivo em mgCH ₄ /m ² .d, no eixo Y da direita a temperatura em °C, representadas em função das amostragens com o coletor de gás, numeradas de forma seqüencial.....	81

FIGURA 5.5: Altura do manto de lodo em centímetros, distribuído por linha, nas datas descritas na legenda. A linha 15 está do lado da saída da lagoa, ao passo que a linha 165 está do lado da entrada.....	83
FIGURA 5.6: Altura do manto de lodo em centímetros, distribuído por linha, nas datas descritas na legenda. A linha L1 está do lado da entrada da lagoa, ao passo que a linha L10 está do lado da saída.....	85
FIGURA 5.7: Distribuição do manto de lodo no interior da lagoa de decantação n.º04, com a altura do manto em centímetros, segundo a batimetria realizada em 03/02/2010 (Tabela 5.14). A linha “L1” está próxima da entrada da lagoa, enquanto “L10” está próxima da saída.....	86
FIGURA 5.8: Distribuição do manto de lodo no interior da lagoa de decantação n.º04, com a altura do manto em centímetros, segundo a batimetria realizada em 02/03/2010 (Tabela 5.15). A linha “L1” está próxima da entrada da lagoa, enquanto “L10” está próxima da saída.....	87
FIGURA 5.9: Distribuição do manto de lodo no interior da lagoa de decantação n.º04, com a altura do manto em centímetros, segundo a batimetria realizada em 07/04/2010 (Tabela 5.16). A linha “L1” está próxima da entrada da lagoa, enquanto “L10” está próxima da saída.....	88
FIGURA 5.10: Distribuição do manto de lodo no interior da lagoa de decantação n.º04, com a altura do manto em centímetros, segundo a batimetria realizada em 06/05/2010 (Tabela 5.17). A linha “L1” está próxima da entrada da lagoa, enquanto “L10” está próxima da saída.....	89
FIGURA 5.11: Fluxos ebulitivos de metano (eixo principal) e a altura do manto de lodo (eixo secundário).....	91
FIGURA 5.12: Emissões anuais de metano por fontes, em TgCH ₄	93
FIGURA 5.13: Ocorrência dos fluxos de metano após a instalação da cobertura para recuperação do metano.....	97

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1: Fontes e Sumidouros de Metano.	17
TABELA 3.2: Poder Calorífico do Metano.....	32
TABELA 4.1: Dados operacionais médios da ETEJ de junho de 2009 à maio de 2010.	42
TABELA 4.2: Valores obtidos da altura (em cm) do manto de lodo nos pontos de amostragem durante a batimetria nas lagoas de decantação n.º03 e n.º04, realizada em 07/04/2010.....	46
TABELA 5.1: Concentração de metano nas amostras de biogás coletadas na lagoa de decantação n.º03, com o coletor de biogás, entre os meses de fevereiro à agosto de 2008.....	64
TABELA 5.2: Concentração de metano nas amostras de biogás, coletadas com a câmara estática e o coletor de biogás em 11/02/10, na lagoa de decantação n.º04.	65
TABELA 5.3: Concentração de metano nas amostras de biogás, coletadas com a câmara estática e o coletor de biogás em 25/02/10, na lagoa de decantação n.º04.	65
TABELA 5.4: Concentração de metano nas amostras de biogás, coletadas com a câmara estática, diretamente da atmosfera (a 20 centímetros da superfície da lagoa) e com a câmara adaptada, em 11/03/10, na lagoa de decantação n.º04.....	66
TABELA 5.5: Concentração de metano nas amostras de biogás, coletadas com a câmara estática, o coletor de biogás e diretamente da atmosfera (a 20 centímetros da superfície da lagoa) em 08/04/10, na lagoa de decantação n.º04.....	66
TABELA 5.6: Concentração de metano nas amostras de biogás, coletadas com a câmara adaptada para coleta somente do fluxo difusivo, coletor de biogás e diretamente da atmosfera (a 20 centímetros da superfície da lagoa) em 22/04/10, na lagoa de decantação n.º04.....	67
TABELA 5.7: Concentração de metano nas amostras de biogás, coletadas com a câmara adaptada para coleta somente do fluxo difusivo e o coletor de biogás em 06/05/10, na lagoa de decantação n.º04.	67
TABELA 5.8: Concentração de metano nas amostras de biogás, coletadas com o coletor de biogás em 13/05/10, escolhidos 6 pontos aleatórios, ao longo de toda a lagoa de decantação n.º04.....	68

TABELA 5.9: Fluxos de metano calculados para todas as datas e pontos de coleta.	70
TABELA 5.10: Valores dos fluxos médios de metano do conjunto das lagoas de decantação n.º03 e n.º04.	75
TABELA 5.11: Fluxo médio total (ebulitivo + difusivo) de metano medido na câmara estática nas diversas coletas realizadas.	75
TABELA 5.12: Fluxos mínimos e máximos de metano em quatro etapas da planta de tratamento de esgoto de Durham.	79
TABELA 5.13: Batimetrias realizadas durante a primeira campanha. Todas as medidas da altura do manto de lodo estão em centímetros. As alturas do manto de lodo em cada ponto de amostragem é o valor médio para cada linha e coluna, incluindo-se a média da lagoa por dia e a média geral para o período todo. As medidas foram realizadas durante a primeira campanha, para a lagoa de decantação n.º03.	82
TABELA 5.14: Altura do manto de lodo (centímetros) nos 30 pontos de medição. Amostragem realizada na lagoa de decantação n.º04, em 03/02/2010.	84
TABELA 5.15: Altura do manto de lodo (centímetros) nos 30 pontos de medição. Amostragem realizada na lagoa de decantação n.º04, em 02/03/2010.	84
TABELA 5.16: Altura do manto de lodo (centímetros) nos 30 pontos de medição. Amostragem realizada na lagoa de decantação n.º04, em 07/03/2010.	84
TABELA 5.17: Altura do manto de lodo (centímetros) nos 30 pontos de medição. Amostragem realizada na lagoa de decantação n.º04, em 06/05/2010.	85
TABELA 5.18: Todas as medidas da altura do manto de lodo estão em centímetros. Estão representadas 24 medições de fluxo ebulitivo realizados nas duas campanhas de coletas, nas lagoas de decantação n.º03 e n.º04.	90
TABELA 5.19: Estimativa da emissão diária e anual de metano pelas 4 lagoas de decantação existentes na ETEJ.	93
TABELA 5.20: Comparativo da emissão de metano nas estações de tratamento de esgoto de Jundiá e Durhan, em função da carga orgânica tratada.	94
TABELA 5.21: Composição típica média do biogás, proveniente de diferentes resíduos orgânicos.	96
TABELA A.1: Variáveis ambientais medidas em 11/02/2010.	106
TABELA A.2: Volume de biogás coletado e tempos das coletas, utilizados nos cálculos dos fluxos e o número do relatório de análise das amostras na ACQUALAB.	106
TABELA A.3: Variáveis ambientais medidas em 25/02/2010.	107
TABELA A.4: Volume de biogás coletado e tempos das coletas, utilizados nos cálculos dos fluxos e o número do relatório de análise das amostras na ACQUALAB.	107
TABELA A.5: Variáveis ambientais medidas em 11/03/2010.	108
TABELA A.6: Volume de biogás coletado e tempos das coletas, utilizados nos cálculos dos fluxos e o número do relatório de análise das amostras na ACQUALAB.	108
TABELA A.7: Variáveis ambientais medidas em 08/04/2010.	109

TABELA A.8: Volume de biogás coletado e tempos das coletas, utilizados nos cálculos dos fluxos e o número do relatório de análise das amostras na ACQUALAB.	109
TABELA A.9: Variáveis ambientais medidas em 22/04/2010.	110
TABELA A.10: Volume de biogás coletado e tempos das coletas, utilizados nos cálculos dos fluxos e o número do relatório de análise das amostras na ACQUALAB.....	110
TABELA A.11: Variáveis ambientais medidas em 06/05/2010.	111
TABELA A.12: Volume de biogás coletado e tempos das coletas, utilizados nos cálculos dos fluxos e o número do relatório de análise das amostras na ACQUALAB.....	111
TABELA A.13: Variáveis ambientais medidas em 13/05/2010.	112
TABELA A.14: Volume de biogás coletado e tempos das coletas, utilizados nos cálculos dos fluxos e o número do relatório de análise das amostras na ACQUALAB.....	112
TABELA A.15: Variáveis ambientais medidas durante a primeira campanha de amostragem.....	113
TABELA A.16: Densidade calculada para as condições de pressão e temperaturas durante a amostragem, volume de biogás coletado e tempos das coletas, utilizados nos cálculos dos fluxos e o número do relatório de análise das amostras na TASQA.	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ASTM	American Society for Testing and Materials
BOT	Built, Operation and Transfer
C	Concentração
CFC	Clorofluorcarbonetos
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CSJ	Companhia Saneamento de Jundiaí
D	Coefficiente de Difusão
d	Diâmetro
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DCE	Detector de Captura de Eletrons
d_{CH_4}	Densidade do Metano
DCT	Detector de Condutividade Térmica
DDT	Para-diclorodifeniltricloroetano
DFC	Detector Fotométrico de Chama
DIC	Detector de Ionização de Chama
DQO	Demanda Química de Oxigênio
X_{CH_4}	Concentração do Metano
Dr.	Doutor
DTI	Detector Termoiônico
EPA	Environmental Protection Agency
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
ETEJ	Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí
FCAV	Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias
FE	Fase Estacionária
FM	Fase Móvel
H	Henry
h	Altura
HCFC	Hidroclorofluorcarboneto
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change

J	Fluxo
k_m	Coefficiente Convectivo de Transferência de Massa
M_{CH_4}	Massa Molar do Metano
N	Fluxo da Transferência de Massa (Molar)
n	Fluxo da Transferência de Massa
n.º	Número
N.A.	Nível d'água
Nm^3	Normal metro cúbico
OD	Oxigênio Dissolvido
P	Pressão
p	Pressão parcial
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PET	Politereftalato de Etileno
pH	Potencial Hidrogeniônico
Prof.	Professor
Q	Vazão
R	Constante dos Gases
Rec	Recuperado
t_{DBO}	Tonelada de DBO
TDH	Tempo de detenção hidráulica
t_{DQO}	Tonelada de DQO
$T_{g_{CH_4}}$	Teragrama de metano
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UNFCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
V	Volume
v/v	Volume por Volume
ΔC	Variação da Concentração
Φ	Fluxo

1. INTRODUÇÃO

Atualmente tem-se discutido que o incremento no efeito estufa mudará o clima em todo o mundo. Este incremento representa um aumento na temperatura média global, o que poderá, por sua vez, trazer vários efeitos negativos à vida na Terra. Assim, é importante a identificação dos fatores que causam esta elevação nas temperaturas para que possam ser tomadas medidas imediatas de controle, para evitar algum tipo de catástrofe.

Na virada do século, segundo Baird (2002), ao contrário da depleção da camada de ozônio estratosférica, que tem se manifestado de forma espetacular, com falhas na camada de ozônio, como “buracos”, o fenômeno de aquecimento global devido ao efeito estufa não foi observado de maneira a convencer a todos de sua existência.

Passados oito anos, as evidências do aquecimento global tornaram-se maiores, mas mesmo assim, os reais compromissos com o controle do problema parecem “tímidos”, como se o momento fosse uma fase de consciência global e não de controle eficiente.

A Terra como um corpo aquecido, irradia energia, e esta energia irradiada deveria ser igual à energia absorvida, para que não existisse variação na temperatura, porém gases presentes no ar podem absorver uma parte desta energia irradiada, reemitindo-a em várias direções aleatórias, sendo parte devolvida à superfície da Terra, provocando o aquecimento adicional tanto da superfície como do ar (BAIRD, 2002).

Um dos principais gases responsáveis por reemitir a energia para a superfície da Terra é o metano. O metano é o hidrocarboneto mais abundante na atmosfera terrestre e

desempenha um papel importante nos seus processos químicos e é um dos principais sumidouros do radical hidroxila ($\bullet\text{OH}$), o qual indica o poder oxidante da atmosfera.

Presume-se que o aumento do metano atmosférico seja consequência de atividades humanas, como o aumento da produção de alimentos, o uso de combustíveis fósseis, o desflorestamento e a queima de biomassa. Cerca de 70% das emissões atuais de metano são de origem antrópica. Sua produção primária tem origem na decomposição de matéria orgânica por bactérias em meios anaeróbios, como em áreas alagadas naturais: pântanos, várzeas e mangues; sistemas de tratamento de efluentes e resíduos: lagoas anaeróbias, lagoas de decantação e aterros sanitários; bem como o trato de sistemas digestivos de ruminantes e outros animais (CHANG & YANG, 2003).

A concentração atmosférica do metano mais que dobrou em relação ao seu valor pré industrial, o que é muito preocupante, pois o seu potencial estufa é cerca de 21 vezes maior que o do dióxido de carbono, devido à relativa maior eficiência das moléculas de metano em absorver radiação infra-vermelha emitida a partir da superfície terrestre (LAY et al. 1996).

Outros sumidouros do gás metano são as reações com o solo e a perda para a estratosfera. O tempo de vida médio do metano atmosférico é de 10 a 15 anos (BAIRD, 2002).

Neste trabalho a proposta principal será a quantificação da emissão de metano, nas lagoas de decantação da Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí - ETEJ, avaliando-se as contribuições pelos fluxos ebulitivos e difusivos, indicando-se uma maneira para controle dessa emissão.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Realizar uma estimativa da quantificação da emissão de metano nas lagoas de decantação da Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí.

2.2. Objetivos Específicos

- 2.2.1. Avaliar os métodos mais adequados para a captação e quantificação dos fluxos emitidos, ebulitivos e difusivos, separadamente;
- 2.2.2. Verificar a correlação entre a emissão de metano e o perfil do manto de lodo no interior das lagoas;
- 2.2.3. Observar a influência da temperatura nas emissões de metano;
- 2.2.4. Comparar os fluxos de metano obtidos com resultados de outras regiões, avaliando a contribuição das lagoas de decantação;
- 2.2.5. Estimar o potencial energético a partir da recuperação do metano emitido;
- 2.2.6. Propor uma maneira para minimizar a emissão de metano nas lagoas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Desenvolvimento Sustentável

A preocupação com a água, com a poluição e com os impactos sociais, o surgimento dos movimentos preservacionistas e os avanços da ciência, são acontecimentos que foram se somando ao longo da história, pressionando por mudanças, definindo ideários e determinando um novo paradigma que incorporasse as questões ambientais, expressas em uma política ambiental. Em meados de 1950 começou a ser utilizado o termo “desenvolvimento sustentável”, no entanto a sua difusão aconteceu a partir de 1970, quando ficava clara a preocupação com a degradação ambiental, com a condição social dos desprivilegiados, com a falta de saneamento, com o consumo indiscriminado e com a poluição ambiental. Assim, muitos conceitos relativos a novos princípios de desenvolvimento passaram a ser gradativamente incorporados aos planejamentos, como a perspectiva de esgotamento dos recursos naturais, a velocidade com que os diferentes estilos de vida vêm alterando o meio ambiente, o conceito de qualidade de vida distinto do padrão de vida, a degradação do meio, medida pela capacidade de suporte e sistemas de autocontrole, ou a noção de recursos versus serviços ambientais e ecológicos (SANTOS, 2004).

Passaram, ainda, a existir encontros internacionais para debater temas voltados à conservação ambiental, à qualidade de vida na Terra e à consolidação política e técnica do desenvolvimento sustentável. Dentre vários encontros pode-se destacar a Rio-92, com a criação da Agenda 21 (1997), documento que estabeleceu a importância de cada país em se comprometer, global e localmente, no estudo de soluções para os problemas sócio-

ambientais. Segundo Rutkowski (1999), a Agenda 21 (1997) foi proposta como um programa dinâmico que deveria ser levado a cabo pelos diversos atores políticos segundo as diferentes situações, capacidades e prioridades dos países e regiões, estando, entretanto, a responsabilidade de sua execução prioritariamente com os governos. No capítulo 18 da Agenda 21 (1997), a água é reconhecida como um dos elementos mais importantes na vida na Terra, bem como a crescente degradação de sua qualidade com a poluição de fontes de superfície e subterrânea. Os problemas mais graves que afetam a qualidade da água de rios e lagos decorrem do lançamento de esgotos domésticos sem tratamento, controles inadequados dos efluentes industriais, perda e destruição das bacias de captação, localização errônea de unidades industriais, desmatamento, agricultura mitigatória sem controle e práticas agrícolas deficientes.

No capítulo 9 da Agenda 21 (1997) é estabelecida a necessidade de proteção da atmosfera, preocupando-se com as mudanças no clima e a variabilidade climática, a poluição do ar e a destruição do ozônio, criando-se novas demandas de informação científica, econômica e social, para reduzir as incertezas remanescentes nessas áreas, sendo necessária melhor compreensão e capacidade de previsão das diversas propriedades da atmosfera e dos ecossistemas afetados, bem como de suas conseqüências para a saúde e suas interações com os fatores sócio-econômicos. A promoção de um desenvolvimento sustentável cita o controle das emissões de gases que provocam o efeito estufa como uma medida necessária.

Hellmund & Smith (2006) alertaram que as comunidades humanas estão preocupadas com o equacionamento destes problemas e que se os passos não forem dados rapidamente, o desenvolvimento poderá impedir para sempre as oportunidades para a natureza existir ao lado das comunidades, diminuindo grandemente a qualidade de vida dos moradores urbanos.

A qualidade de vida, enquanto um indicador proposto pela nossa própria agenda, é aqui entendido como: “um conceito em crescimento, com pretensões muito além de somente maximizar a taxa de crescimento econômico. Portanto, supera o simples cálculo da capacidade de consumo dos indivíduos. Nele, estão inclusas questões ligadas ao bem estar e à felicidade dos indivíduos, à sanidade física e psicológica, à ética e ao respeito a cada ser

humano. São exemplos as preocupações com habitações em locais mais saudáveis, o direito do lazer, o contato com áreas verdes, o controle de agentes poluidores, o direito sobre o espaço (SANTOS², 1998 apud RUTKOWSKY, 1999).

Este objetivo de longo prazo orienta para uma estratégia de gestão que seja sequencial e interativa, se desenvolvendo, de acordo com Santos (1998) apud Rutkowsky (1999), em ciclos de três fases que interagem – análise, planejamento e gerenciamento. A fase de análise do território objetiva o conhecimento e a interpretação dos eventos a fim de identificar problemas, oportunidades e condicionantes, enquanto a de planejamento territorial objetiva propor a modificação da realidade evolutivamente no tempo segundo as metas e objetivos previstos, e a de gerenciamento objetiva modificar a realidade aplicando as propostas negociadas.

A Agenda 21 (1997) é apenas uma das ferramentas que discutem e orientam as propostas favoráveis ao desenvolvimento sustentável, mas muitas outras realizaram-se com o mesmo foco. Recentemente, em 2009 foi realizada a Conferência das Nações Unidas de Copenhague sobre as mudanças climáticas, após a qual já pôde ser observado o compromisso de vários países, inclusive aqueles que formam parte do chamado mundo desenvolvido. Segundo Alves (2010), vários países que são responsáveis por aproximadamente 78% das emissões globais de carbono, enviaram documento à UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) estabelecendo metas de redução que vão desde percentuais modestos, como as dos Estados Unidos até as mais ambiciosas, como as da Noruega.

3.2. Controle dos Poluentes da Atmosfera Terrestre

Historicamente, foi considerado que os produtos químicos emitidos para o ambiente seriam assimilados pela natureza, transformados em substâncias de ocorrência natural, não prejudiciais, ou diluídos em tal extensão que não poderiam ser atribuídos aos

² SANTOS, R. F. Conservação e Gestão dos Recursos Naturais – Textos de orientação. UNICAMP, 1998.

mesmos quaisquer riscos para a vida. Nos anos 60 e 70, a premissa de que “a solução para a poluição é a diluição” começou a perder a força, frente à constatação de que muitos produtos químicos sintéticos não são assimilados porque são persistentes, isto é, não são alterados pela ação da luz, água, ar ou microorganismos (que atuam com frequência na degradação de muitos poluentes) durante períodos muito longos de tempo. Exemplos dessas substâncias persistentes incluem pesticidas, como o DDT, os gases de refrigeração chamados CFC, o gás dióxido de carbono e as formas tóxicas do elemento mercúrio (BAIRD, 2002).

Baird (2002) nos coloca também que os clorofluorcarbonetos (CFC), compostos que contêm flúor, cloro e carbono, emitidos para a atmosfera foi um dos principais destruidores da camada de ozônio. A preocupação com a destruição da camada de ozônio, devido ao aumento da concentração de cloro na atmosfera, levou a uma conferência em Montreal, Canadá, em 1987, gerando o Protocolo de Montreal, este acordo foi posteriormente reforçado pelas decisões que se seguiram às conferências de Londres, em 1990, Copenhague, em 1992, Viena, em 1995, e novamente Montreal, 1997. Como resultado desse acordo internacional, todos os produtos químicos depletivos de ozônio deveriam ser gradualmente proibidos em todas as nações, incluindo-se os CFC, HCFC, entre outros. Sem estes acordos internacionais, aumentos catastróficos de cloro, poderiam ter ocorrido, já que particularmente o uso e a emissão para a atmosfera de CFC poderia ter aumentado de forma dramática.

De maneira semelhante, com o aumento da conscientização (ou da preocupação) sobre as consequências da poluição do ar, mais precisamente com as mudanças climáticas, e mais destacadamente com a emissão dos gases do efeito estufa, foi criado em 1997 o Protocolo de Kyoto. Este Protocolo tem como objetivo firmar acordos e discussões internacionais para conjuntamente estabelecer metas de redução na emissão dos gases do efeito estufa, principalmente por parte dos países industrializados, além de criar formas de desenvolvimento de maneira menos impactante àqueles países em pleno desenvolvimento.

3.3. O Efeito Estufa e o Aquecimento Global

Tem-se ouvido previsões de que o “efeito estufa” afetará o clima em todo o mundo ao longo do século 21 e nos séculos seguintes. O termo “efeito estufa”, de uso comum, significa que a temperatura média global do ar aumentará de vários graus como resultado do aumento na quantidade de gás carbônico, metano e outros gases na atmosfera. Tal efeito deletério, é na verdade, um incremento no efeito estufa originalmente existente no planeta.

O efeito estufa é um processo natural que mantém aquecidas, a superfície e a atmosfera da Terra. É um fenômeno global causado pela presença de gases na atmosfera da Terra, que absorvem parte do calor irradiado da superfície da Terra, e o devolve à mesma, mantendo-a aquecida e impedindo que o calor recebido pela radiação solar seja totalmente perdido, o que deixaria o planeta coberto por uma camada de gelo.

Enquanto o efeito estufa é um processo natural, a indústria, o uso da terra, as queimadas, os desmatamentos, consumo de biomassa e combustíveis fósseis, poluição e outras atividades do homem têm aumentado a concentração desses gases e, conseqüentemente, tem contribuído para uma elevação da temperatura do planeta de forma mais rápida.

Este aumento significativo da temperatura média global é conhecido como “aquecimento global” – aumento da temperatura média dos oceanos e do ar perto da superfície da Terra – sendo considerado um dos maiores problemas globais.

Como o entendimento da mudança do clima é recente, o mesmo não era prioritário nos países em desenvolvimento, onde as demandas de importância se referiam somente ao atendimento de necessidades urgentes, nas áreas social e econômica, tais como a erradicação da pobreza, a melhoria das condições de saúde, o combate à fome, a garantia das condições dignas de moradias, entre outras (VIEIRA & SILVA, 2006).

Atualmente têm aumentado muito, em todo o mundo, as discussões sobre o aquecimento global, sendo apresentadas diversas propostas para o seu controle. Uma das medidas é a redução da emissão desses gases, conhecidos como “gases indutores do efeito estufa”, sendo o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄) os principais (HARGREAVES & FOWLER, 1998).

Segundo Baird (2002), a emissão per capita de dióxido de carbono nos países em desenvolvimento é cerca de um décimo daquela observada nos países desenvolvidos, mas está crescendo. Outro problema é a quantidade significativa de dióxido de carbono adicionada à atmosfera quando florestas são devastadas e a madeira é queimada para preparar a terra para o uso agrícola.

Depois do dióxido de carbono, o metano é o gás indutor do efeito estufa de maior importância. Por molécula, um aumento da quantidade de metano no ar causa um efeito de aquecimento 21 vezes maior que a adição de dióxido de carbono, porque as moléculas de metano absorvem uma maior fração dos fótons do infravermelho térmico do que as moléculas do dióxido de carbono. Contudo, o aumento de 80 vezes no número de moléculas de dióxido de carbono confirma que, no momento, o metano é menos importante para o aquecimento global. Estima-se que o metano tenha produzido cerca de um terço de todo o aquecimento global produzido pelo dióxido de carbono (BAIRD, 2002). Na figura 3.1, adaptada do IPCC (2007) pode-se observar as mudanças na concentração dos principais gases do efeito estufa a partir de dados de testemunho de gelo e dados modernos, e pelo forçamento radiativo.

As concentrações atmosféricas globais de dióxido de carbono e metano aumentaram bastante em função das atividades humanas desde 1750 e agora ultrapassam em muito os valores pré-industriais determinados com base em testemunhos de gelo de milhares de anos. Os aumentos globais da concentração de dióxido de carbono se devem principalmente ao uso de combustíveis fósseis e à mudança no uso da terra. Já os aumentos da concentração de metano são devidos principalmente à agricultura.

O forçamento radiativo mede a influência de um fator na alteração do equilíbrio da energia que entra e sai do sistema Terra-atmosfera e é um índice da importância do fator como possível mecanismo de mudança do clima. O forçamento positivo tende a aquecer a superfície, enquanto que o forçamento negativo tende a esfriá-la. No relatório do IPCC (2007), os valores do forçamento radiativo são para 2005, relativos às condições pré-industriais definidas em 1750, e são expressos em watts por metro quadrado.

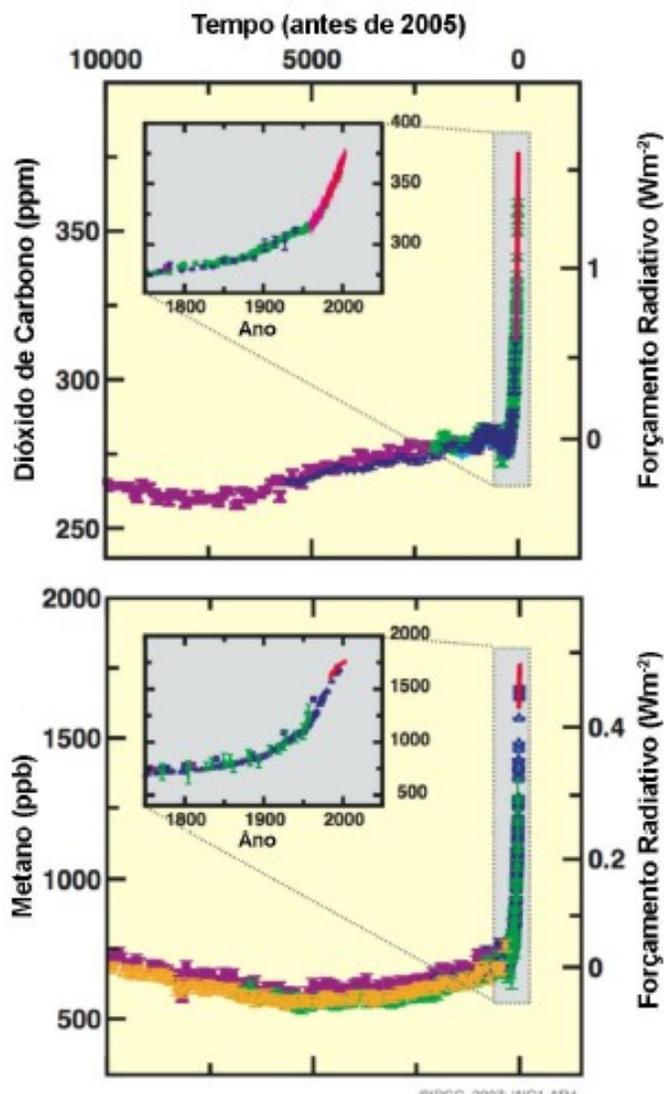


FIGURA 3.1: Concentrações atmosféricas de dióxido de carbono e metano ao longo dos últimos 10.000 anos (painéis grandes) e desde 1750 (painéis pequenos). As medições foram obtidas a partir de testemunhos de gelo (símbolos com diferentes cores para diferentes estudos) e amostras atmosféricas (linhas vermelhas). Os forçamentos radiativos correspondentes são mostrados nos eixos do lado direito dos painéis grandes.

Fonte: adaptado do IPCC (2007)

3.4. Fontes e Sumidouros de Metano

Como visto anteriormente, o metano é produzido por diversos mecanismos, biológicos ou não, mas a parcela mais importante se dá pela decomposição anaeróbia. Tal processo se dá onde ocorre a decomposição de plantas ou resíduos (substrato) submersos em água como, por exemplo, pântanos ou brejos (RAMOS, 2008).

Os níveis globais de metano mais que dobraram desde a era pré-industrial (BLAKE & ROWLAND, 1988). Diversos estudos e modelos mostram que a maior parte do aumento nas concentrações de metano desde os tempos pré-industriais é devida principalmente ao aumento das emissões de fontes antropogênicas (KHALIL & RASMUSSEN, 1994). Em contraste, o metano tem um tempo de residência atmosférico de aproximadamente uma década, pouco em relação ao dióxido de carbono, óxido nítrico e CFC, que permanecem por muitas décadas. Este tempo de residência representa a quantidade média de tempo que uma de suas moléculas existe no ar antes de ser removida por algum tipo de sumidouro, sendo que quanto maior o tempo de vida atmosférico, maior ação total no efeito estufa.

Segundo Fearnside (2004), a Lei de Henry estabelece que a solubilidade de um gás em um líquido é diretamente proporcional à pressão parcial do gás e inversamente proporcional à temperatura. A diminuição da solubilidade facilita a transferência do mesmo no meio líquido para a atmosfera.

Dentre as propriedades físico-químicas do metano, tem-se a sua massa molar e a sua densidade, segundo Perry (1963):

- $M_{\text{CH}_4} = 16,04 \text{ g/mol}$;
- $d_{\text{CH}_4} = 0,716 \text{ g/L}$ (nas CNTP).

3.4.1. Fontes Biológicas

O metano é desprendido para a atmosfera, por várias fontes, podendo ser tanto naturais quanto antropogênicas. As emissões naturais originam-se em solos alagados, como

pântanos e áreas de inundação, e nos trato digestivos de ruminantes como gado ou ovelhas, de ruminantes selvagens como búfalos, de cupins e também nos humanos (Figura 3.2). As emissões antropogênicas originam-se pela decomposição de resíduos biológicos como aterros sanitários e sistemas de tratamento de esgotos (anaeróbios e lagoas – anaeróbias e decantação), queima de biomassa, represas e agricultura como o cultivo de arroz (Figura 3.3). A produção biológica de metano tem relação direta com a temperatura. Segundo Marani (2007) esta dependência com a temperatura pode representar um importante mecanismo de realimentação na mudança de clima: se a atmosfera se aquece, as emissões dessas fontes aumentam, elevando a concentração de CH₄ na atmosfera e ampliando o aquecimento, que pode causar um novo aumento nas emissões.

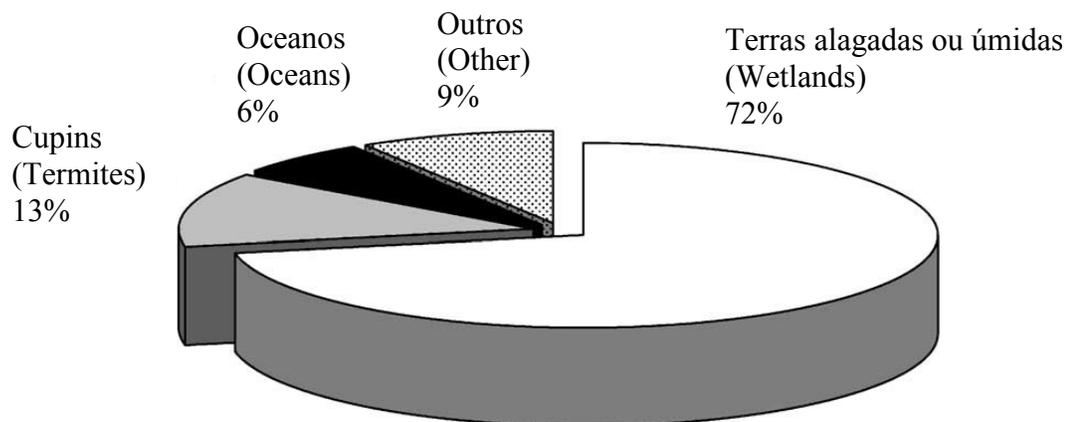


FIGURA 3.2: Contribuição de fontes individuais para emissões naturais de metano.

Fonte: Khalil³ et al., 2000 apud Wuebbles e Hayhoe, 2002

³ Khalil M.A.K., SHEARER, M.J. Sources of Methane: an overview. Atmospheric Methane: Its Role in the Global Environment Springer-Verlag, New York, NY, p. 98-111, 2000.

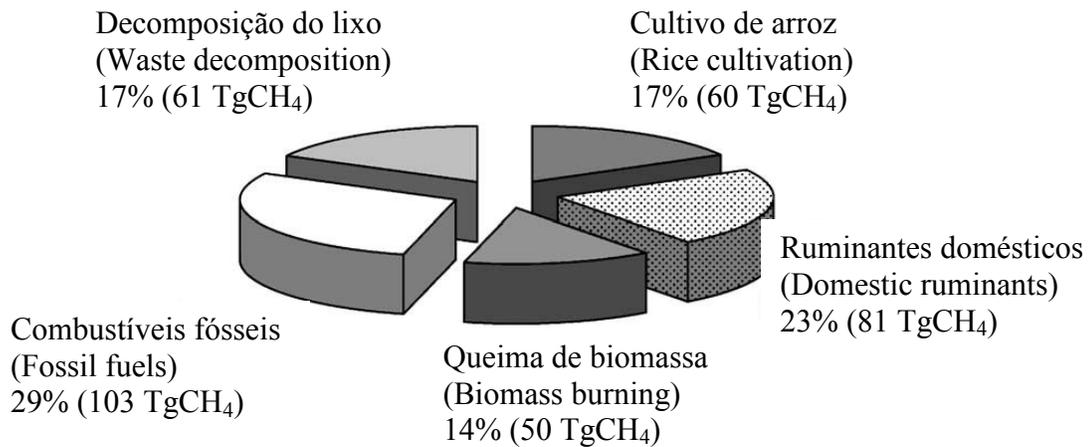


FIGURA 3.3: Contribuição de fontes individuais para emissões antropogênicas de metano.

Fonte: Khalil et al., 2000 apud Wuebbles e Hayhoe, 2002

As emissões podem ser influenciadas por fatores ambientais como velocidade dos ventos, pH e quantidade de oxigênio dissolvido na água, além da temperatura da água e do substrato, como já citado. Em áreas alagadas, existe um ambiente ideal para o desenvolvimento das arqueas metanogênicas, responsáveis pela geração de metano em meio anaeróbico, pois a condição anaeróbia é garantida pela lâmina d'água e elevada concentração da matéria orgânica. Nestas áreas, tanto as emissões naturais como as antropogênicas do metano produzido, ocorrem por meio de difusão na lâmina d'água e por ebulição (liberação de bolhas), mecanismos que serão abordados a seguir (WUEBBLES E HAYHOE, 2002).

A queima de matéria orgânica e de biomassa pode liberar grandes quantidades de metano para a atmosfera. Na combustão completa, a emissão principal é de CO₂, porém quando a combustão ocorre de maneira incompleta – o material queima lentamente na “forma de brasa” – grande quantidade de CH₄ é liberada (LEVINE et al, 2000).

A decomposição de resíduos orgânicos em meios anaeróbios como aterros sanitários, sistema de tratamento de esgotos anaeróbios e lagoas de decantação, também são

responsáveis pela emissão de metano, devido à grande quantidade de matéria orgânica presente nestes lugares, sendo um dos contribuintes antropogênicos mais importantes, com emissões significativas, juntamente com as plantações de arroz (PEER et al, 1993).

3.4.2. Fontes Não Biológicas

As fontes não biológicas de emissão de metano estão no processamento dos combustíveis fósseis, minas de carvão e na extração de petróleo (LIVESLEY et al., 2008).

A principal fonte de metano no uso de combustíveis fósseis são os vazamentos que ocorrem durante o processamento, a transmissão e a distribuição do gás natural, que consiste em 90% de metano. A magnitude desta fonte depende diretamente da perda, a qual é estimada entre 1% e 2% de todo o gás natural produzido nos países desenvolvidos. Estes dados podem ser mais elevados uma vez que o levantamento é relativo à países desenvolvidos, nos quais presume-se que o transporte seja melhor controlado do que em países menos desenvolvidos (BECK⁴ et al, 1993 apud WUEBBLES e HAYHOE, 2002).

Outra fonte de metano provém das minas de carvão, quando o metano que ficou preso entre as camadas de carvão durante a sua formação, é explorado. A emissão estimada, global e regional, neste caso, depende de muitas considerações como o tipo de carvão, a profundidade da mina, processos de extração, metano contido na jazida de carvão, e se o metano é queimado ou reaproveitado (LIVESLEY et al., 2008).

3.4.3. Sumidouros

Segundo Wuebbles e Hayhoe (2002), em contraste com as numerosas formas de metano, existem somente três sumidouros para o metano troposférico. A reação com o radical hidroxila (OH•) é a principal delas, sendo responsável pela remoção de aproximadamente 500 T⁵gCH₄/ano (aproximadamente 90% do total removido), tornando a concentração de (•OH) o determinante mais importante da taxa de remoção do metano da

⁴ BECK, L.L., PICCOT, S.D., KIRCHGESSNER, D.A. Industrial sources. In: Khalil, M. (Ed.) Atmospheric Methane: Sources, Sinks and Role in Global Change. New York, NY: Springer-Verlag, p. 341-399, 1993.

⁵ Tera grama – 1 Tg = 10¹² g = 10⁹ kg

atmosfera. O radical hidroxila é formado da foto dissociação do ozônio troposférico e do vapor d'água. É o oxidante primário para muitos poluentes da troposfera, incluindo monóxido de carbono, espécies NO_x e compostos orgânicos (CRUTZEN, 1995).

O remanescente de CH₄ é removido por meio de oxidação por solos secos (30 TgCH₄/ano) e pelo transporte para a estratosfera. Estimava-se que este transporte equivaleria a uma taxa de 40 TgCH₄/ano, porém segundo Gettelman (et al, 1997) foi encontrado posteriormente apenas 27 TgCH₄/ano, segundo dados da Upper Atmosphere Research Satellite. A oxidação por solos secos se dá pela presença de bactérias metanotróficas, que tem o metano como seu único alimento (KELLER⁶ et al, 1990 apud MARANI, 2007). O transporte do metano para a estratosfera se dá por processos de difusão turbulenta de circulação global. Na estratosfera, segundo as equações 3.1 a 3.3, o metano torna-se a maior fonte de vapor d'água por meio de sua oxidação (CICERONE⁷ e OREMLAND, 1988 apud MARANI, 2007).



Devido às variedades de fontes o balanço global do metano pode ser afetado por diversos fatores, como mudanças nas políticas de geração e uso de energia, distribuição da população humana, alterações em práticas agrícolas e variações no clima. Na tabela 3.1 é possível observar-se as principais estimativas das fontes e sumidouros envolvidos no balanço global do metano atmosférico. Observa-se na tabela que as incertezas nas estimativas de emissão e remoção ainda permanecem grandes, com o total de emissões compreendendo uma faixa entre 410 e 660 TgCH₄/ano e a remoção situando-se entre 430 e 600 TgCH₄/ano.

⁶ KELLER, M., MITRE, M.E., STALLARD, R.F., Consumption of Atmospheric Methane in Soils of Central Panama: effects of agricultural development. *Global Biogeochemical Cycles*, v.4, n.1, p. 21-27, Mar. 1990.

⁷ CICERONE, R.J., SHETTER, K.D., Sources of atmospheric methane: measurements in rice paddies and a discussion. *J. Geophys. Res.*, v.2, n.4, p 299-327, Dec. 1988.

TABELA 3.1: Fontes e Sumidouros de Metano.

Fonte	Emissão (TgCH₄/ano)	Faixa de Estimativa (TgCH₄/ano)
Áreas alagadas	100	92 – 232
Cupins	20	2 – 22
Oceanos	4	0,2 – 20
Outros	21	12,4 – 38,2
Total Natural	145	
Ruminantes	81	65 – 100
Cultivo de arroz	60	25 – 90
Total Agrícola	141	
Gás natural	30	25 – 50
Mineração de carvão	46	15 – 64
Queima de carvão	15	1 – 30
Indústria petrolífera	15	5 – 30
Queima de biomassa	50	27 – 80
Aterros sanitários	61	40 – 100
Total Antropogênico	217	
Total	503	410 – 660
Sumidouro	Absorção (TgCH₄/ano)	Faixa de Estimativa (TgCH₄/ano)
OH troposférico	445	360 – 530
Transporte	40	32 – 48
Absorção por solos	30	15 – 45
Total	515	430 – 600

Fonte: Adaptada de Wuebbles e Hayhoe, 2002.

3.5. O Tratamento de Esgoto

Em meio às prioridades de uma administração municipal voltada à cidadania, é necessário fazer parte de seu Plano Diretor a implantação de um sistema de esgotamento sanitário, composto por um sistema adequado ao tratamento com elevada eficiência, incluindo a coleta de 100% dos esgotos gerados pelo município.

O planejamento e a construção deste sistema de esgotamento sanitário e de tratamento do esgoto coletado, seja ele pequeno, médio ou de grande porte, é um desafio para os administradores da cidade, mas este desafio é urgente face aos impactos causados às bacias hidrográficas e, pelo lado social, pela vulnerabilidade na proliferação de doenças ligadas à falta de saneamento básico.

Segundo Lettinga e van Haandel, 1994, o objetivo principal do tratamento de esgoto é a correção das suas características indesejáveis, de tal maneira que o seu uso ou a sua disposição final possa ocorrer de acordo com as regras e critérios definidos pelas autoridades legislativas.

Uma estação de tratamento de esgoto, para atingir níveis satisfatórios de eficiência precisará apresentar um efluente com uma parcela pequena o suficiente de sólidos em suspensão, nutrientes (principalmente nitrogênio e fósforo), de organismos patogênicos, de compostos inorgânicos, bem como de uma redução acima de 90% na remoção da DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio). Esgotos com frações de águas residuárias industriais normalmente requerem tratamentos que removam ou reduzam os constituintes particulares, como pesticidas, compostos de enxofre, metais potencialmente tóxicos e etc. Lembrando que a definição dos valores mínimos presentes no efluente dependerá do tipo de sistema empregado na ETE e da classificação das águas do corpo receptor do efluente lançado pela ETE.

Nos primeiros sistemas de tratamento, construídos no fim do século XIX, o objetivo da remoção era a parte visível, ou seja, os sólidos sedimentáveis, chamado de tratamento primário, mas segundo Lettinga e van Haandel (1994), esta remoção era insuficiente, porque existia ainda a presença de material orgânico, que era usado por microrganismos presentes na água do manancial, causando o decaimento do oxigênio

dissolvido, diminuindo a qualidade desejável das águas. Por essa razão foram desenvolvidos vários sistemas de tratamento para reduzir o teor de material orgânico. Para esse tratamento, chamado tratamento secundário, os métodos mais adequados são os biológicos. Distinguem-se dois metabolismos básicos para a remoção de material orgânico: (1) o aeróbio, quando o material é oxidado para produtos minerais e (2) o anaeróbio, que pode se desenvolver quando não há disponibilidade de um oxidante adequado para o material orgânico. Nesse segundo processo os produtos finais são gases, predominantemente metano e dióxido de carbono (biogás). Entretanto, a descarga de efluente com a presença excessiva de nutrientes (nitrogênio e fósforo), prejudica a qualidade da água do corpo receptor, causando o fenômeno chamado de eutrofização, necessitando a remoção desses nutrientes, tratamento terciário, para adequação do lançamento aos limites da classificação do corpo receptor, segundo a legislação vigente.

Dentre os sistemas biológicos de tratamento de esgoto que adotem processos aeróbios e/ou anaeróbios, encontram-se diversas configurações, inclusive combinações entre estes dois processos. Os diferentes sistemas de tratamento de esgotos apresentam vantagens e desvantagens sobre os demais, sendo necessária a escolha do que melhor se adapte ao tipo de esgoto a ser tratado, disponibilidade de área para construção, características do corpo receptor, eficiência pretendida e necessária, geração de lodo, consumo de energia, liberação de odores, entre outros.

3.6. Fundamentos da Digestão Anaeróbia

Conforme foi visto no capítulo anterior os mecanismos de biodegradação utilizados nos sistemas de tratamento biológico de esgoto podem ser aeróbios ou anaeróbios, porém a formação de metano não ocorre em ambientes onde oxigênio, nitrato ou sulfato encontram-se prontamente disponíveis como receptores de elétrons, ou seja, a produção de metano ocorre em ambientes que apresentem condições para o

desenvolvimento do metabolismo anaeróbio, tais como pântanos, solos, sedimentos de rios, lagos, lagoas e mares, assim como no sistema digestivo de animais ruminantes.

Esta digestão apresenta uma característica bastante importante quanto à associação sintrófica existente entre os microrganismos envolvidos no processo de degradação da matéria orgânica complexa. Parte dos microrganismos metaboliza os compostos iniciais presentes em outros compostos de menor complexidade, que por sua vez são metabolizados pela outra parte dos microrganismos envolvidos, produzindo metano, dióxido de carbono e água (NOUR, 1996).

Segundo Chernicharo (1997), a digestão anaeróbia de compostos orgânicos complexos é normalmente considerada um processo de dois estágios. No primeiro estágio, um grupo de bactérias facultativas e anaeróbias, denominadas formadoras de ácidos ou fermentativas degradam os compostos orgânicos complexos. Compostos orgânicos complexos como carboidratos, proteínas e lipídios são hidrolisados, fermentados e biologicamente convertidos em materiais orgânicos mais simples, principalmente ácidos voláteis. No segundo estágio ocorre a conversão dos ácidos orgânicos, gás carbônico e hidrogênio em produtos finais gasosos, o metano e o gás carbônico. Esta conversão é efetuada por um grupo especial de bactérias, denominadas formadoras de metano, as quais são estritamente anaeróbias. As arqueas metanogênicas dependem do substrato fornecido pelas acidogênicas, configurando portanto uma interação comensal. Uma vez que as arqueas são responsáveis pela maior parte da degradação do resíduo, a sua baixa taxa de crescimento e de utilização dos ácidos orgânicos normalmente representa o fator limitante no processo de digestão como um todo. Embora o processo de digestão anaeróbia seja simplifiadamente considerado como de duas fases, este pode ser subdividido em quatro fases principais, hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

A metanogênese, etapa mais importante relacionada à condição anaeróbia das lagoas de decantação, é descrita por Chernicharo (1997) como sendo a etapa final no processo da degradação anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono, dividindo-se em dois grupos principais, que formam metano a partir de ácido acético ou metanol (acetoclásticas) e que formam metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono (hidrogenotróficas), sendo:

- *Metanogênicas acetoclásticas*: São capazes de produzir metano a partir do acetato, sendo responsáveis por cerca de 60 a 70% desta produção. Pertencem a dois gêneros principais: *Methanosarcina* e *Methanosaeta*. O gênero *Methanosaeta* caracteriza-se por utilizar exclusivamente o acetato, desenvolvendo-se na forma de filamentos e com grande importância na, *Methanosarcina* desenvolvem-se na forma de cocos, que se agrupam formando pacotes, sendo considerados os mais versáteis entre os metanogênicos, já que possuem espécies capazes de utilizar também o hidrogênio e as metilaminas (SOUBES, 1994);
- *Metanogênicas hidrogenotróficas*: Ao contrário das acetoclásticas, praticamente todas as espécies conhecidas de bactérias metanogênicas são capazes de produzir metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono. Os gêneros mais frequentemente isolados em reatores anaeróbios são: *Methanobacterium*, *Methanospirillum* e *Methanobrevibacter* (CHERNICHARO, 1997).

3.7. Cromatografia a Gás

A cromatografia pode ser conceituada como um método físico-químico de separação, na qual os constituintes da amostra a serem separados são particionados entre duas fases, uma estacionária e de grande área, e a outra um fluido insolúvel que percola através da primeira. A cromatografia se baseia, portanto, na partição da amostra entre uma fase móvel (FM) líquida ou gasosa e uma fase estacionária (FE) – líquida ou sólida (CIOLA, 1985).

De um modo geral, o processo cromatográfico tem efeito ao se introduzir a fase estacionária num tubo – coluna cromatográfica. A amostra é introduzida no topo da coluna e a fase móvel é bombeada continuamente a uma velocidade constante. Com o passar da fase móvel, as substâncias começam a migrar de acordo com as interações de suas

propriedades físico-químicas com as da fase móvel e as da estacionária. No término da coluna instala-se um monitor que detecta as substâncias separadas e transmite para um registrador um sinal proporcional à sua concentração (CIOLA, 1985).

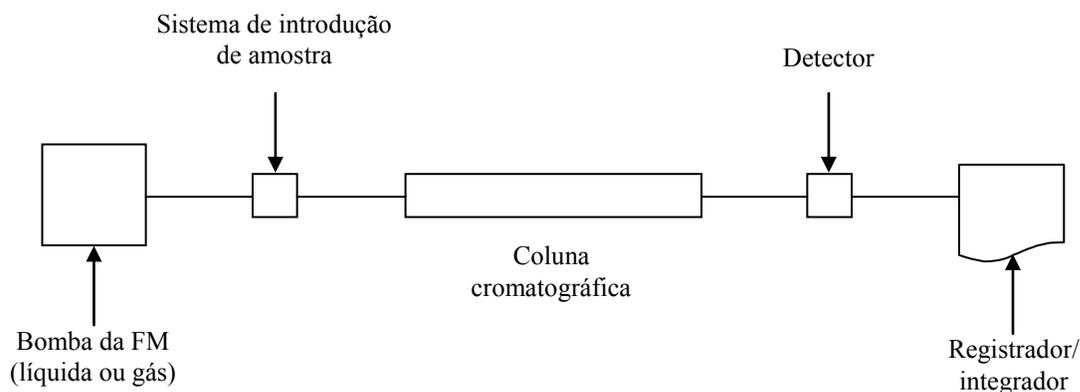


FIGURA 3.4: Diagrama de bloco de um cromatógrafo genérico.

Fonte: Ciola, 1985

Na cromatografia gasosa a amostra é carregada por um gás, chamado gás de arraste, através de uma coluna. A escolha de um gás de arraste apropriado, que leve a amostra através da coluna ao detector, é importante em todos os tipos de trabalho cromatográfico. Em alguns casos, a eficiência da coluna, o tempo de análise, a alta ou baixa sensibilidade do detector são determinados pelas propriedades do gás de arraste. Hidrogênio, hélio, argônio, nitrogênio e dióxido de carbono são os gases de arraste mais comuns. As diferenças entre a interação dos constituintes da amostra e o material que compõe a coluna faz com que cada constituinte percorra em diferentes tempos, o que causa a separação. O tempo transcorrido entre a injeção da amostra e o pico do constituinte de interesse é denominado tempo de retenção. Após percorrerem a coluna, os compostos de interesse são detectados por um detector apropriado. A purificação da fase móvel é

importante por várias razões, a análise de traços (ppm ou ppb) com detectores ultra – sensíveis requerem gases de arraste extremamente limpos (CIOLA, 1985).

As colunas cromatográficas são os dispositivos fundamentais de um cromatógrafo, que permitem a separação dos constituintes da amostra. Para se obter a separação de compostos é necessário que a coluna seja suficiente, isto é, tenha um alto número de pratos teóricos ou que ela seja seletiva, ou seja, que exista uma grande diferença entre os coeficientes de partição (ou adsorção) das substâncias de interesse (CIOLA, 1985).

Segundo Ciola (1985), os detectores são dispositivos que transformam num sinal elétrico conveniente a variação da composição do gás de arraste ao sair da coluna cromatográfica. Existem vários tipos de detectores, sendo os principais: detector de condutividade térmica – DCT; detector de ionização de chama – DIC; detector de captura de elétrons DCE; detector fotométrico de chama – DFC; detector termoiônico – DTI; entre outros. Para a determinação das concentrações de metano os mais utilizados são os detectores de ionização de chama e os detectores de condutividade térmica.

3.8. Transferência de Massa

A transferência de massa em sentido amplo pode ser entendida como o movimento espacial da matéria. No sentido mais restrito, como o movimento de um componente específico num sistema de vários componentes. Existindo regiões com diferentes concentrações ocorrerá o fenômeno da transferência de massa, que podem ocorrer por meio de diferentes mecanismos (DUAN et al., 2005).

De acordo com a segunda lei da termodinâmica, haverá fluxo de matéria de uma região de maior para outra de menor concentração de uma determinada espécie química. Esta espécie que é transferida denomina-se soluto. As regiões que contém o soluto podem abrigar quantidades de uma ou mais espécies químicas distintas do soluto, as quais são denominadas solventes. O conjunto soluto-solvente, por sua vez, é conhecido como mistura (para gases) ou solução (para líquidos). Tanto uma como outra constituem o meio onde

ocorrerá o fenômeno da transferência de massa. Portanto a “transferência de massa” é um fenômeno ocasionado pela diferença de concentração, maior para a menor, de um determinado soluto em um certo meio.(CREMASCO, 2002)

A diferença de concentração do soluto, enquanto causa, traduz-se em “força motriz”, necessária ao movimento da espécie considerada de uma região a outra, sendo a resposta desse movimento associado à resistência oferecida pelo meio ao transporte do soluto, onde esta resistência depende da (1) interação soluto-meio e (2) interação soluto-meio com uma ação externa. Ainda segundo Cremasco (2002), quando se menciona interação, implica dizer relação intrínseca entre o par soluto-meio. O transporte se dá a nível molecular, no qual há movimento aleatório entre as moléculas, cujo fluxo líquido obedece a segunda lei da termodinâmica. Há ação substancial da concentração do soluto no espaço considerado, em que a força motriz associada é o gradiente de concentração do soluto. Nesse caso o fenômeno é conhecido como difusão, no qual a resistência ao transporte está associada somente à interação soluto-meio. A transferência de massa poderá ocorrer ainda em nível macroscópico, cuja força motriz, a diferença de concentração e a resistência ao transporte estão associadas à interação soluto-meio com uma ação externa. Essa ação externa relaciona-se com as características dinâmicas do meio e a geometria do lugar onde ele se encontra. Esse fenômeno é conhecido como convecção mássica. Há casos em que a transferência de massa ocorre por difusão e convecção mássica, simultaneamente.

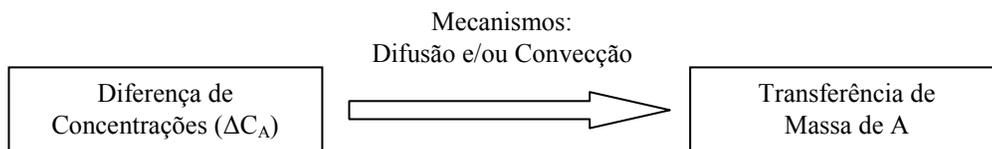


FIGURA 3.5: O Fenômeno da Transferência de Massa.

Fonte: Adaptado do Portal da Engenharia Química – Transferência de Massa

3.8.1. Leis de Equilíbrio Entre Fases

A transferência de massa através de uma fase ou entre duas fases passando a fronteira entre elas, líquida-líquida, líquida-sólida, gás-líquida ou gás-sólida, requer um deslocamento das condições de equilíbrio. Por exemplo, ao adicionar-se sal numa panela com água a transferência de massa irá ocorrer até a concentração de sal na água atingir o valor máximo, designado pela solubilidade, a qual depende da temperatura da água (CREMASCO, 2002).

Em alguns casos é possível obter uma expressão analítica simples como o equilíbrio líquido-gás, descritos pela Lei de Henry, válida para misturas diluídas, equação (3.4).

$$p_A = H.C_A \quad (3.4)$$

sendo,

p_A : pressão parcial do gás em [Pa];

C_A : concentração do gás em [mol/m³];

H: constante de Henry em [Pa m³/mol ou J/mol]

3.8.2. Difusão (Leis de Fick)

Difusão é o transporte de massas de moléculas individuais através de uma barreira ou um espaço livre, que ocorre segundo um processo aleatório, e que depende de um gradiente de concentração. A difusão também pode ser definida como a tendência das moléculas se deslocarem de uma região de elevada concentração para outra região de concentração baixa, sendo uma consequência direta do movimento browniano. O movimento browniano das moléculas garante que o sistema passe de um estado inicial, certamente não em equilíbrio, para um estado final de energia livre mínima e entropia máxima e, portanto em equilíbrio. A difusão pode ser vista como um processo no qual a

concentração tende a se igualar em todos os pontos do sistema, com o passar do tempo, ou seja, a difusão é um processo no qual a diferença de concentração é reduzida através de um fluxo espontâneo de matéria (PIETROBON et al, 2004).

Este fluxo é proporcional ao gradiente de concentração dC/dx :

$$J = -D.(dC/dx) \quad (3.5)$$

Sendo,

D: coeficiente de difusão em $[cm^2/s]$;

C: concentração em $[g/cm^3$ ou moles];

x: distância do movimento perpendicular a superfície da barreira em $[cm]$

J: fluxo em $[g/cm^2.s]$;

O sinal negativo da equação significa que a difusão ocorre na direção da diminuição da concentração do difusante. A equação (3.5) é conhecida como a primeira Lei de Fick. Esta lei estabelece que o fluxo de matéria é proporcional à diminuição da concentração e inversamente proporcional à distância da interface.

Segundo Pietrobon et al. (2004), a primeira Lei de Fick relaciona o fluxo de material com o gradiente de concentração, descrevendo o processo de difusão sob condições de estado estacionário, ou seja, o gradiente de concentração, dC/dx , não varia com o tempo. No entanto, na maioria dos métodos experimentais utilizados para estudar a difusão, se tem interesse na variação da concentração com o tempo e a distância. Neste caso a primeira Lei de Fick pode ser convertida em uma equação diferencial parcial de segunda ordem, a segunda Lei de Fick, equação (3.6):

$$(dC/dt) = D.(d^2C/dx^2) \quad (3.6)$$

Sendo,

D: coeficiente de difusão em $[\text{cm}^2/\text{s}]$;

C: concentração em $[\text{g}/\text{cm}^3$ ou moles];

x: distância do movimento perpendicular a superfície da barreira em $[\text{cm}]$

t: tempo do movimento a superfície em $[\text{s}]$;

A segunda Lei de Fick representa a velocidade de alteração da concentração de soluto em função do tempo e do deslocamento, ou seja, dois fatores importantes na determinação do coeficiente de difusão de qualquer soluto em diferentes sistemas.

3.8.3. Convecção Mássica

A convecção mássica é um fenômeno de transferência de massa; contribuição convectiva ou advecção é a influência do movimento do meio no transporte do soluto. A convecção mássica pode ser apresentada segundo a equação (3.7):

$$n_{A,y} = km.(\rho_{Ap} - \rho_A) \quad (3.7)$$

sendo,

$n_{A,y}$: fluxo da transferência de massa em $[\text{mol}/\text{m}^2.\text{s}]$;

km: coeficiente convectivo de transferência de massa em $[\text{mol}/\text{m}^2.\text{s}.\text{Pa}]$;

ρ_{Ap} : pressão parcial na superfície em $[\text{Pa}]$;

ρ_A : pressão parcial no meio em $[\text{Pa}]$.

A equação (3.7) além de mostrar que a força motriz ao fluxo mássico do soluto é a diferença de concentração, define empiricamente o coeficiente convectivo de transferência de massa k_m . Este coeficiente é um parâmetro cinemático e depende do movimento e das características do meio, bem como da interação molecular soluto-meio. É importante salientar que o k_m diz respeito somente a um meio. Por outro lado, a maioria das aplicações práticas do fenômeno de transferência de massa envolvem, no mínimo, dois meios ou duas fases. Em tais situações o soluto migra de uma fase à outra, caracterizando a transferência de massa entre fases. Neste caso, as forças motrizes em cada fase são distintas entre si, pois se referem a meios diferentes. Por exemplo, na absorção da amônia contida no ar por intermédio da corrente gasosa com água, haverá o transporte do soluto amônia presente na mistura gasosa em direção à água. A força motriz relacionada ao soluto na fase gasosa poderá estar referenciada à diferença da sua fração molar ou à diferença da sua pressão parcial. Já na fase líquida, a força motriz associada ao fluxo da amônia poderá ser dada em função da sua diferença de fração molar nessa fase ou devido à diferença de concentração molar (CREMASCO, 2002).

Segundo Cremasco (2002), o fluxo de matéria representado na equação (3.7) pode ser escrito na forma molar do seguinte modo:

$$N_{A,y} = k_m.(C_{Ap} - C_A) \quad (3.8)$$

sendo,

$N_{A,y}$: fluxo da transferência de massa em $[\text{mol}/\text{m}^2.\text{s}]$;

k_m : coeficiente convectivo de transferência de massa em $[\text{m}/\text{s}]$;

C_{Ap} : concentração próxima na superfície em $[\text{mol}/\text{m}^3]$;

C_A : concentração no meio em $[\text{mol}/\text{m}^3]$.

A convecção mássica pode ser causada por agentes mecânicos externos ao que acontece no interior da região de transporte, neste caso tem-se a convecção mássica forçada. Todavia, quando o movimento do meio for ocasionado pela combinação do gradiente de concentração do soluto, provocando-se a variação na densidade do meio, e de uma ação volumar, sem a ação dos agentes mecânicos, tem-se a convecção natural (CREMASCO, 2002).

A difusão, como visto, trata da transferência de matéria regida principalmente por fenômenos que ocorrem em nível molecular. Contudo, a transferência de massa não ocorre somente nesse nível; quantidades macroscópicas de matéria podem ser transportados por perturbações na mistura em que estão contidos. Tais perturbações ocasionam movimentação do meio de transporte e o soluto será transferido tanto devido ao seu gradiente de concentração quanto em virtude do movimento do meio. Esses dois tipos de mecanismos quando aglutinados caracterizam a convecção mássica (CREMASCO, 2002).

A convecção mássica natural surge quando forças de volume, como o campo gravitacional, atuam sobre um fluido (mistura) no qual se encontram gradientes da sua densidade decorrentes de concentração do soluto presente na mistura. O empuxo mássico advém da ação conjunta do campo gravitacional e do gradiente de concentração do soluto, sendo o responsável pelo movimento da mistura (CREMASCO, 2002).

3.9. Lagoas de Estabilização

Os sistemas de lagoas de estabilização constituem-se na forma mais simples para o tratamento dos esgotos, sob o aspecto operacional. Há diversas variantes dos sistemas de lagoas de estabilização, com diferentes níveis de operacionalidade, processos envolvidos e requisitos de área (VON SPERLING, 1986). Neste estudo será considerado o sistema de lagoas aeradas de mistura completa seguidas por lagoas de decantação.

As lagoas aeradas de mistura completa são sistemas aeróbios, no qual os mecanismos de aeração, além de garantir a oxigenação da lagoa, mantém os sólidos

presentes no líquido, em suspensão, de forma a existir a mistura completa no meio. O tempo de detenção hidráulica (TDH) típico deste tipo de lagoa é da ordem de 3 a 4 dias.

Segundo von Sperling (1986), a qualidade do efluente de uma lagoa aerada de mistura completa não é adequada para lançamento direto, pelo fato de conter elevados teores de sólidos suspensos. Por esta razão, estas lagoas são normalmente seguidas por outras lagoas, onde a sedimentação e estabilização destes sólidos possam ocorrer. Tais lagoas são denominadas de lagoas de decantação. O TDH nas lagoas de decantação são baixos, da ordem de 1 a 2 dias.

O TDH da lagoa de decantação tem que ser o suficiente para uma remoção eficiente dos sólidos em suspensão produzidos na lagoa aerada. A remoção dos sólidos ocorre em duas etapas distintas, na primeira os sólidos sedimentam no interior da lagoa, já na segunda etapa os sólidos têm que ser removidos do interior da lagoa de forma mecanizada. A remoção adequada do lodo é importante para que as lagoas não fiquem com um elevado manto de lodo, o que poderia causar a perda na qualidade do efluente, devido ao arraste de partículas de biomassa para o efluente final da ETE e ao mesmo tempo diminuir o valor do TDH na lagoa. Hoje, existem experiências de envio do lodo extraído destas lagoas para usos como fertilizantes.

Nas lagoas de decantação ocorrem dois fenômenos, a separação dos sólidos em suspensão e a sedimentação destes no fundo das lagoas. A separação permite a saída de um efluente clarificado e o sólido armazenado fica retido para a remoção posterior, na etapa de desidratação da ETE. O valor de TDH e o tipo de sedimentação são os fatores que determinam a eficiência desta etapa de tratamento. Nos sistemas de tratamento de esgoto encontram-se alguns tipos de sedimentação, como por exemplo, discreta (para sólidos inorgânicos como areia), zonal e compressão (para elevada concentração de sólidos) e floculenta, sendo que esta última normalmente ocorre nas lagoas de decantação, quando as partículas aglomeram-se na medida em que sedimentam, sendo as características alteradas, com o aumento do tamanho (formação de flocos) e, em decorrência, da velocidade de sedimentação. A velocidade de sedimentação é importante para a formação do manto de lodo nas lagoas de decantação (VON SPERLING, 2002).

No interior do manto de lodo, pela ausência de oxigênio e pela existência de matéria orgânica remanescente das lagoas de aeração, inicia-se a degradação da matéria orgânica pelo metabolismo anaeróbio (digestão anaeróbia). Na última etapa da digestão anaeróbia ocorre a geração de CH_4 , CO_2 e dependendo do tipo de matéria orgânica H_2S . O metano (de interesse no estudo) gerado pode ficar armazenado por um período no interior do manto, sendo transferido para a atmosfera por meio de bolhas ou ser transferido para o meio líquido por difusão, inclusive a solubilidade do metano é maior quanto maior for a pressão e menor a temperatura. Mais próximo à interface líquido-atmosfera (superfície da lagoa) a pressão é menor e a temperatura tende a ser maior, diminuindo a solubilidade, sendo o metano liberado à atmosfera.

3.10. Poder Calorífico

O crescente interesse na recuperação do biogás gerado pelo lixo urbano, pelas estações de tratamento de efluentes, pela biodigestão da vinhaça, pelo resíduo da cana de açúcar, e pelos rejeitos animais, associado ao seu uso energético, bem como para melhorar a questão do gerenciamento dos resíduos no Brasil, é um assunto que vem sendo discutido há algum tempo (SALOMON e LORA, 2005).

Segundo Salomon e Lora (2005), o biogás proveniente da digestão anaeróbia de resíduos sólidos ou líquidos constitui uma fonte de energia alternativa, bem como contribui em muito na questão ambiental.

Este biogás é composto por uma mistura de gases, onde o metano e o dióxido de carbono estão em maiores proporções. O poder calorífico do biogás depende diretamente do seu teor de metano (SILVA et al., 2005).

O poder calorífico é a característica que mais desperta a atenção em um gás combustível, podendo ser expresso tomando-se por base uma massa unitária (kg) ou um volume unitário (m^3). No caso da base ser volumétrica, é necessário referir-se às condições de temperatura e de pressão: Nm^3 , normal metro cúbico, a 760 mmHg (1 atm abs) e 0°C .

No Brasil costuma-se exprimir o poder calorífico de um gás em kcal/Nm³, kcal/m³ ou kcal/kg (COSTA⁸, 2010).

O poder calorífico superior (PCS) de um gás combustível é o calor total obtido da queima de uma determinada quantidade unitária do gás com a correspondente quantidade de ar estequiométrico, ambos a 15,6 °C antes da queima, calor esse liberado até que os produtos da combustão sejam resfriados a 15,6 °C. Assim, a água gerada pela queima do hidrogênio presente no combustível estará no estado líquido (COSTA, 2010).

O poder calorífico inferior (PCI) de um gás combustível é obtido pelo seguinte cálculo: poder calorífico superior menos o calor latente de vaporização da água formada pela combustão do hidrogênio presente no combustível (COSTA, 2010). Na tabela 3.2 é apresentado o poder calorífico (superior e inferior) do metano.

TABELA 3.2: Poder Calorífico do Metano.

Gás	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
Metano	13.284	11.946

Fonte: Adaptada de Costa, 2010.

⁸ Costa, Fernando, Senior Partner da Krona – Consultoria e Projeto Ltda., escreve no site www.krona.srv.br, sobre gases combustíveis e combustão.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Local do Desenvolvimento do Estudo

O trabalho se desenvolveu na Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí (ETEJ), localizada no bairro Jardim Novo Horizonte, no município de Jundiaí, São Paulo (Figura 4.1), onde são coletados 97% dos esgotos municipais (industriais e domésticos), destes 100% são tratados. O município de Jundiaí tem pouco mais de 320 mil habitantes e um grande parque industrial.

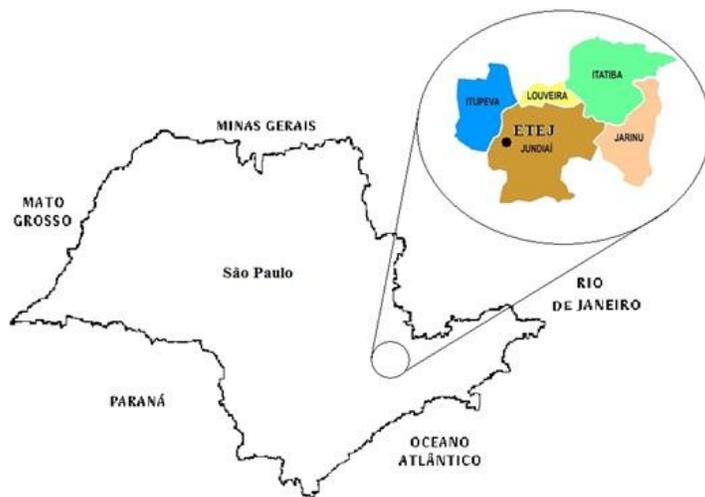


FIGURA 4.1: Localização da ETEJ.

A ETEJ, Figura 4.2, foi construída pela Companhia Saneamento de Jundiaí (CSJ) e inaugurada em 1.998, para o tratamento dos esgotos da cidade. A CSJ foi contratada por concorrência pública de menor tarifa para construção e operação por um período de 30 anos. Esta modalidade de serviço é chamada de concessão precedida de obra pública ou BOT (Build, Operate and Transfer), sendo que o financiamento das obras e o custo de operação são cobertos pelas tarifas ao longo do contrato. Ao término do período de concessão as obras e instalações serão transferidas ao município.

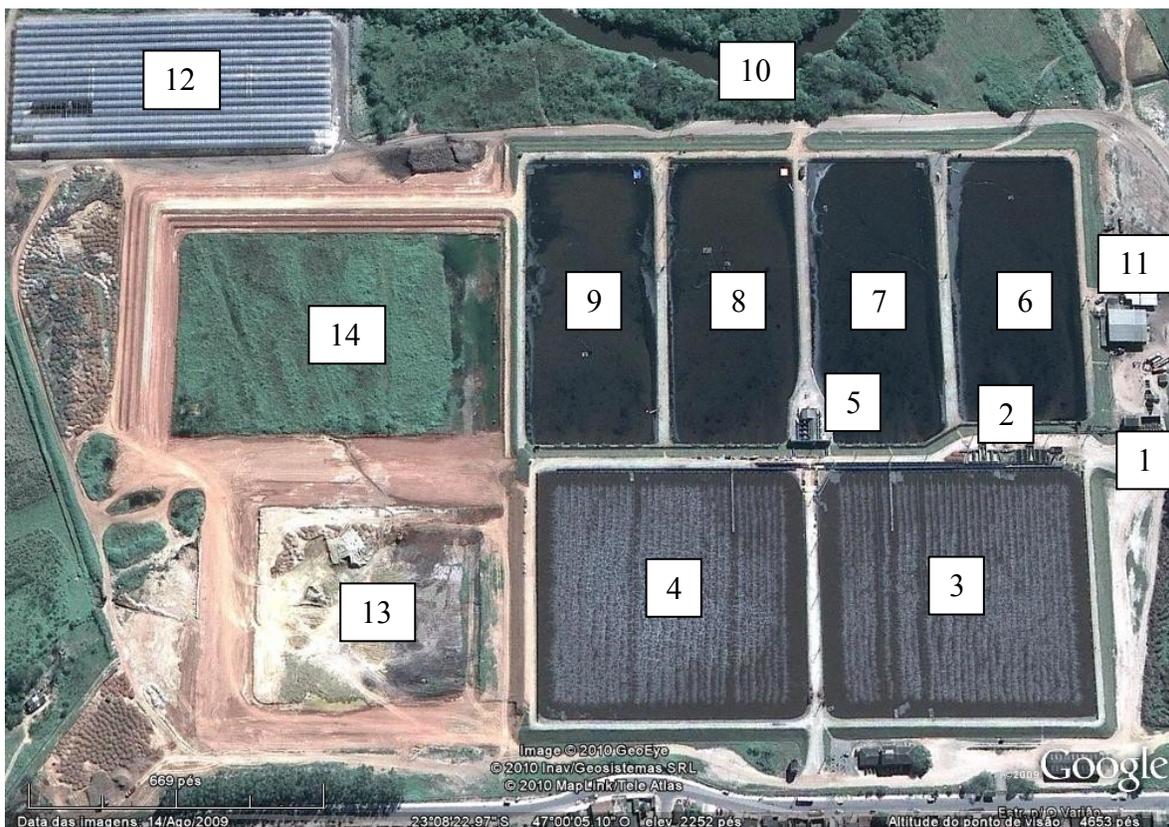


FIGURA 4.2: Vista aérea da ETEJ. Pontos: (1) Entrada/Elevatória; (2) Desarenadores; (3) e (4) Lagoas de aeração 01 e 02, respectivamente; (5) Sopradores; (6) à (9) Lagoas de decantação de 01 à 04, respectivamente; (10) Saída/Rio Jundiaí; (11) Desidratação do lodo; (12) Estufas de lodo; (13) e (14) Lagoa de aeração 03 e Lagoa de decantação 05, respectivamente – em construção.

Fonte: site Google Earth – Imagem de 14/08/2009

O sistema de tratamento de esgoto empregado na ETEJ é bastante simples e robusto, consistindo de lagoas aeradas de mistura completa seguidas de lagoas de decantação. Foi a primeira ETE no Brasil a usar ar difuso em lagoas, com difusores flutuantes de membrana. Atualmente existem dois módulos de tratamento, cada um deles formado por uma lagoa de aeração de mistura completa e duas de decantação. No final de 2008 foram iniciadas as obras de ampliação da ETEJ. A operação da ETEJ é automatizada e utiliza, sem considerar a ampliação, uma demanda elétrica de 3.800 kW. Na Figura 4.3 pode-se observar o fluxograma geral da ETEJ, sendo apresentada uma breve descrição de cada uma delas a seguir.

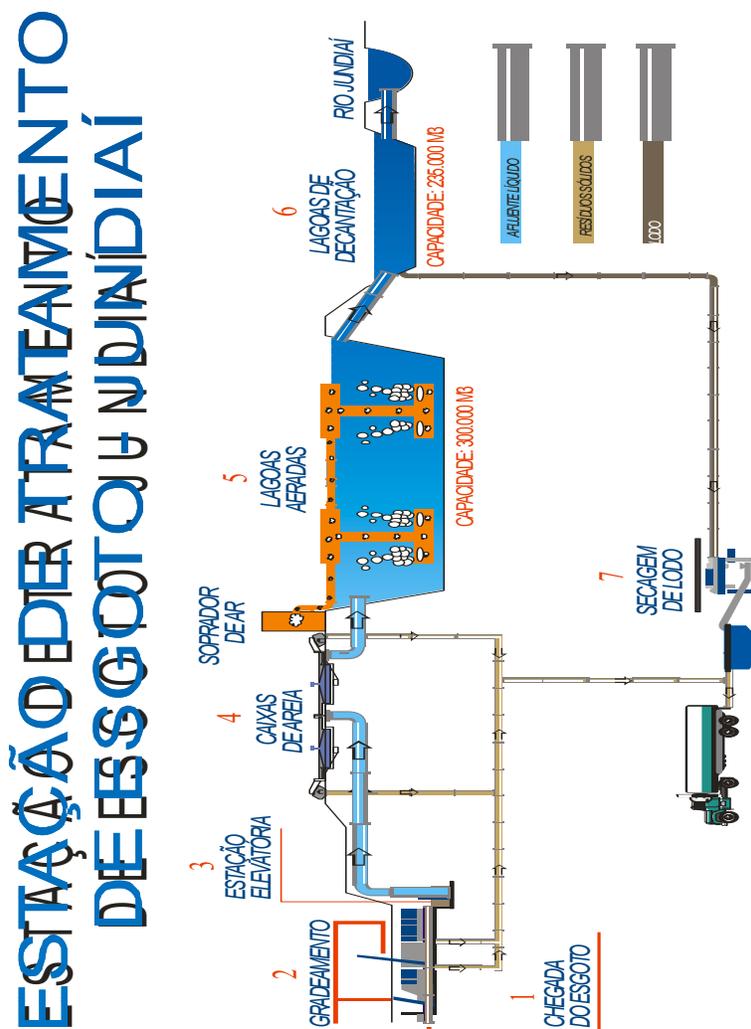


FIGURA 4.3: Fluxograma da ETEJ.

Fonte: Relatório de Acompanhamento e Fiscalização da ETEJ.

4.2. Descrição do Sistema de Tratamento

Etapa 01 – Chegada do Esgoto: O esgoto coletado na cidade chega até a Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí depois de percorrer vários quilômetros de interceptores distribuídos pela cidade, sendo estes interligados à ETEJ em um único ponto, com um diâmetro do interceptor final de 2 metros. A maior parte do afluente chega à ETEJ por gravidade, somente uma pequena parcela necessita de uma elevatória.

Etapa 02 – Gradeamento: Constituído por dois tipos de grades: a primeira com um espaçamento de 10 centímetros, chamado gradeamento grosso (Figura 4.4) e a segunda com espaçamento de 2 centímetros, chamado de gradeamento fino (Figura 4.5). Na primeira grade, de limpeza manual ficam retidos os maiores sólidos. Curiosamente, há algum tempo ficaram retidos vários tipos de animais: uma vaca “inteira”, capivaras, cachorro, entre outros. Na segunda grade a limpeza é feita de forma mecanizada e automática, sendo retidos os menores sólidos como plásticos, panos, maços de cigarros e roedores. O material gradeado é transportado para aterro sanitário (Figura 4.4 e Figura 4.5).



FIGURA 4.4: Gradeamento grosso.



FIGURA 4.5: Gradeamento fino. Pontos: (1) grade mecanizada 01; (2) grade mecanizada 02; (3) correia transportadora dos resíduos para a caçamba.

Etapa 03 – Estação elevatória: Após a etapa do gradeamento o esgoto é bombeado para as próximas etapas do tratamento, por intermédio de bombas submersíveis, com capacidade de 650 L/s cada uma. Hoje existem quatro bombas instaladas que operam em sistema de rodízio. O volume recalcado é totalizado por meio de medidores de vazão eletromagnéticos (Figura 4.6).



FIGURA 4.6: Estação elevatória de esgoto e ao fundo, em vermelho a subestação elétrica exclusiva da elevatória.

Etapa 04 – Desarenadores: O esgoto bombeado da elevatória vem para os desarenadores, onde é retirada a areia e os sólidos particulados de densidade semelhante a areia, presentes no efluente. Nesta unidade os sólidos sedimentados são retirados por um raspador de fundo e uma rosca transportadora do tipo parafuso classificador. O material removido é transportado para aterro sanitário (Figura 4.7).



FIGURA 4.7: Desarenadores.

Etapa 05 – Lagoas de aeração: Unidades de grande importância no tratamento do esgoto. Sopradores injetam ar atmosférico nas lagoas, em forma de minúsculas bolhas de ar, distribuídas através de membranas instaladas a 5 metros de profundidade, transferindo oxigênio ao meio líquido (oxigênio dissolvido), para que os microrganismos aeróbios possam se reproduzir, degradando a matéria orgânica presente no esgoto. Durante a atividade microbiana são formados os flocos biológicos (biomassa) que são mantidos suspensos no interior das lagoas pela ação da aeração, sendo transferidos, continuamente, para as lagoas de decantação, pelo próprio fluxo do líquido. O tempo de detenção hidráulica e celular é de quatro dias. Hoje existem duas lagoas de aeração com capacidade de 150.000 m³ cada uma (Figura 4.8). São realizadas análises de DQO_{dec}, SSV, ST, RS nas amostras coletadas na fase líquida contida no interior da lagoa para controle operacional do processo,

sendo que o oxigênio dissolvido é monitorado constantemente, pois é uma variável importante no processo.



FIGURA 4.8: Lagoa de aeração n.º01.

Etapa 06 – Lagoas de decantação: Os flocos biológicos formados nas lagoas de aeração sedimentam nas lagoas de decantação (Figura 4.9), formando um sedimento constituído por lodo biologicamente ativo, denominado de agora em diante por manto de lodo. Neste manto de lodo continuará a existir degradação da matéria orgânica remanescente, agora pelo metabolismo anaeróbio, uma vez que no fundo destas lagoas não existe a presença de oxigênio dissolvido. O sobrenadante, efluente clarificado é então lançado no rio Jundiá (Figura 4.10).



FIGURA 4.9: Lagoas de decantação n.º03 (em primeiro plano) e n.º04.



FIGURA 4.10: Efluente final.

Etapa 07 – Desaguamento, Compostagem e Armazenamento do Lodo: O lodo sedimentado no fundo das lagoas de decantação é retirado por meio de dragas e encaminhado até os tanques de homogeneização, localizados no interior do galpão de desidratação do lodo (Figura 4.11). Em seguida o lodo é bombeado juntamente com o polieletrólito (catiônico) e processado nas centrífugas, sendo desidratado e, a partir da desidratação passando a ser chamado de “torta”. Na torta é aplicado um agregante para a compostagem. O agregante pode ser preparado na própria ETEJ: poda de árvores picadas – (Figura 4.12) ou adquirido de algum fornecedor externo, por exemplo, bagaço de cana. Após compostado o lodo fica armazenado nas estufas (Figura 4.13) até a aplicação nas fazendas de cana de açúcar ou para o reflorestamento de eucalipto.



FIGURA 4.11: Galpão de desidratação do lodo.



FIGURA 4.12: Picador de madeira, utilizado para picar poda de árvores ou casca de eucalipto.



FIGURA 4.13: Estufas para armazenamento do lodo compostado.

Na Tabela 4.1 são apresentados alguns dados operacionais da ETEJ:

TABELA 4.1: Dados operacionais médios da ETEJ de junho de 2009 à maio de 2010.

Parâmetro	Unidade	Média
Volume mensal tratado	m ³	2.802.497
Vazão média diária	m ³ /dia	92.190
Carga mensal tratada em DBO	t _{DBO}	1.041
Carga mensal tratada em DQO	t _{DQO}	1.893
Eficiência em DBO	%	93,1
pH – entrada		6,9
pH – saída		7,2
Temperatura – entrada	°C	23,0
Temperatura – saída	°C	22,3
Oxigênio Dissolvido – aeração 01	mg/L O ₂	2,8
Oxigênio Dissolvido – aeração 02	mg/L O ₂	2,7
Energia consumida	MWh	1.556
Índice pluviométrico	mm	173
Resíduo sedimentável – entrada	mL/L	3
Resíduo sedimentável – saída 1+2	mL/L	<0,1
Lodo dragado	m ³	20.164
Lodo em torta	t	1.689

4.3. Seleção das Unidades a serem Monitoradas

Dentre as quatro lagoas de decantação foram selecionadas para estudo as lagoas de decantação n.º03 e n.º04, porque ambas apresentavam um manto de lodo maior e uma dificuldade, também maior, de remoção do lodo sedimentado. Em uma primeira etapa de amostragem, as coletas foram realizadas na lagoa n.º03, já durante a segunda etapa, as coletas ocorreram na lagoa n.º04. As considerações a seguir valem para as duas lagoas por serem semelhantes construtivamente. Na figura 4.14 são descritas as dimensões da lagoas.

A alimentação das lagoas é realizada por intermédio de 6 defletores construídos ao longo do sentido transversal, espaçados igualmente entre si, de maneira que a velocidade do efluente vindo da lagoa de aeração n.º02 seja reduzida, produzindo um fluxo mais uniforme na distribuição do efluente com a mínima turbulência, evitando-se correntes preferenciais no interior das lagoas. Na saída existe um muro construído sobre a primeira berma do talude, terminado acima do N.A. máximo (nível d'água máximo), que possui 10 orifícios para coleta d'água ao longo de sua extensão, uniformemente distribuídos no sentido transversal das lagoas, tornando o fluxo de saída do efluente igualmente distribuído e sem correntes preferenciais.

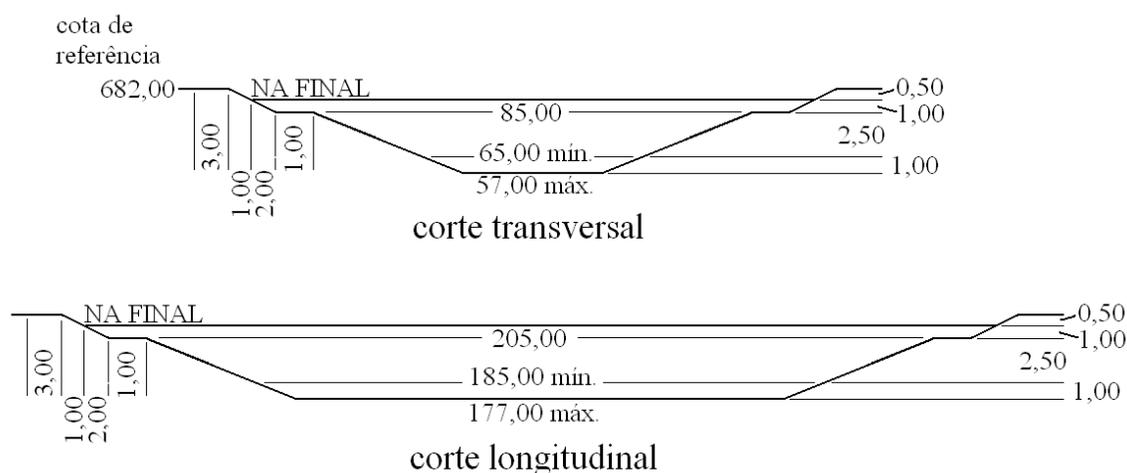


FIGURA 4.14: Perfil das lagoas de decantação n.º03 e n.º04, sem escala, com as medidas em metros, cortes longitudinal e transversal, sendo a profundidade de 4,5 m, a largura de 91,0 m e o comprimento de 211,0 m, ambos medidos na superfície da água.

4.4. Determinação do Manto de Lodo no Interior das Lagoas de Decantação

Conforme foi citado, no fundo das lagoas de decantação o lodo sedimentado forma um manto de lodo (depósito de material orgânico biologicamente ativo). A altura deste manto é um dado importante no controle operacional do processo, pois quanto maior o manto de lodo, menor é o volume da coluna de líquido, conseqüentemente menor o tempo de detenção hidráulica nas lagoas, podendo prejudicar a qualidade do efluente, principalmente pelo arraste de sólidos.

Existem alguns métodos utilizados para a realização da batimetria. Um dos métodos mais simples é o chamado “toalha branca”, no qual são amarrados panos brancos em uma haste de comprimento maior que a profundidade da lagoa, a qual é colocada no interior da lagoa, no sentido vertical, e retirada após algumas horas para verificação da altura da faixa mais escura na haste. As marcas deixadas pelo lodo nos panos brancos não ficam bem definidas necessitando a interpretação do operador, nos indicando que o método é pouco confiável. Outro método utilizado é o do “tubo de acrílico”, no qual é utilizado tubo de acrílico com uma válvula na parte inferior, o qual é colocado no sentido vertical. O tubo tem que ser mergulhado lentamente na lagoa e, quando atingido o fundo da lagoa trava-se a válvula e retira-se o tubo d’água examinando-se as camadas representadas no interior do tubo. Este método também necessita a interpretação do operador e pode sofrer entupimentos durante o mergulho do tubo, alterando-se a leitura do manto, o que deixa o método pouco confiável, também.

O método utilizado atualmente é muito semelhante ao disco de Secchi (Figura 4.15), porém neste caso o disco metálico não possui marcações. No centro do disco metálico é fixada uma corda. Com o barco “ancorado” no ponto de medição o disco metálico é colocado na água, deixando-se que o mesmo afunde livremente até o encontro da camada de lodo. A profundidade atingida pelo disco metálico é a medida da corda que ficou submersa, devendo a corda estar bem tencionada para a medição. Esta medida representa a altura da lâmina d’água, que subtraída da profundidade total da lagoa, resulta na altura do manto de lodo. Este método dispensa a interpretação do operador, o que é uma

vantagem considerável, pois permite que vários operadores a façam, sendo que a imprecisão na leitura entre as diferentes equipes seja menor que o erro global do método.

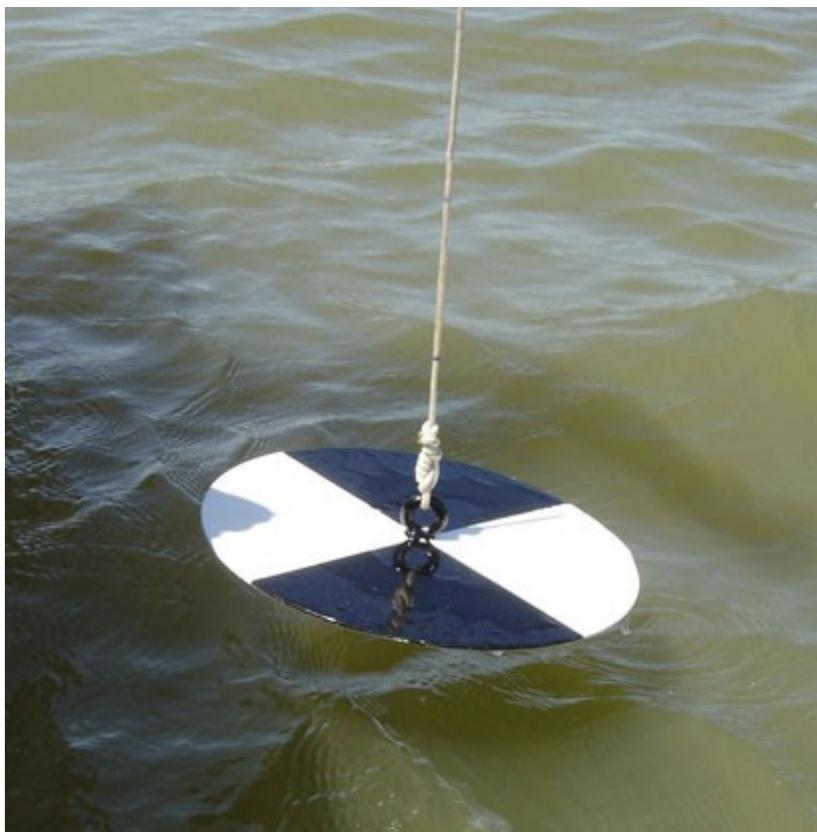


FIGURA 4.15: Disco de Secchi.

A batimetria foi realizada mensalmente, na primeira campanha representou 12 pontos na lagoa de decantação n.º03, já na segunda campanha, realizada na lagoa de decantação n.º04, representou 30 pontos; em ambas lagoas a distribuição dos pontos foi simétrica, existindo 3 colunas imaginárias no sentido transversal (espaçadas uniformemente) e 4 ou 10 linhas imaginárias no sentido longitudinal (espaçadas uniformemente), para a batimetria na lagoa de decantação n.º03 e n.º04, respectivamente. Na Tabela 4.2 pode-se observar, como exemplo, os resultados obtidos em uma das batimetrias realizadas na lagoa de decantação n.º04. Na Figura 4.16, foi feita a representação gráfica dos resultados obtidos, utilizando-se a média dos valores em cada linha imaginária.

TABELA 4.2: Valores obtidos da altura (em cm) do manto de lodo nos pontos de amostragem durante a batimetria nas lagoas de decantação n.º03 e n.º04, realizada em 07/04/2010.

07/04/2010										
Lagoa de decantação 03										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	160	90	196	253	200	150	158	254	240	198
B	120	140	200	240	210	160	196	240	216	220
C	194	224	280	215	195	150	215	366	235	208
Média	158	151	225	236	202	153	190	287	230	209
Lagoa de decantação 04										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	140	180	240	200	250	190	170	320	175	260
B	70	120	219	260	80	200	175	290	170	270
C	20	40	130	260	50	190	150	300	330	400
Média	77	113	196	240	127	193	165	303	225	310

Notas:

- 1 - Nível da água (NA) nas 4 lagoas é de 450 cm (dado de projeto).
- 2 - Valores em vermelho indicam altura do manto de lodo maior que 350 cm
- 3 - As linhas são identificadas de 1 à 10 e as colunas são identificadas de A à C.

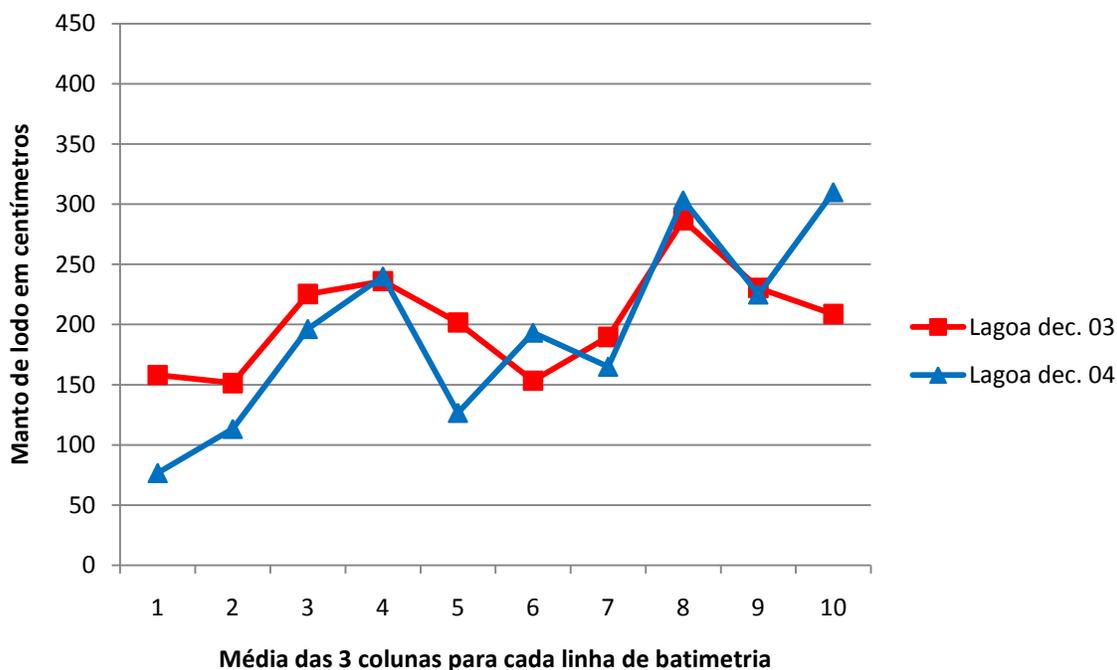


FIGURA 4.16: Representação gráfica do resultado médio das 3 colunas para cada linha da batimetria, relativo ao manto de lodo das lagoas de decantação n.º03 e n.º04. A linha 1 está localizada próxima a entrada da lagoa e a linha 10 próxima a saída.

4.5. Coleta das Amostras de Biogás

Basicamente, a técnica de amostragem consistiu na coleta de amostras de gás, realizadas a cada 30 dias na primeira campanha e a cada 15 dias na segunda, para a determinação do fluxo de metano.

Todas as amostras de gás para envio ao laboratório contratado foram armazenadas em “bags” apropriados, fabricados em polietileno com registro para abertura e fechamento (Figura 4.17), com capacidade para armazenamento de até 1 litro de amostra.



FIGURA 4.17: “Bag” para armazenamento das amostras de gás.

Existiram duas etapas de amostragem conforme descritas a seguir:

4.5.1. Primeira Campanha de Amostragem do Biogás

Nesta etapa as amostras do gás foram coletadas utilizando-se um equipamento de desenvolvimento próprio, construído na oficina da ETEJ, o qual foi batizado pela equipe de “Chapéu Chinês”, o qual será chamado daqui por diante de coletor de biogás.

Todas as amostragens foram realizadas na lagoa de decantação n.º03.

O coletor de biogás, basicamente, é um cone com diâmetro de base muito maior que sua altura (parecido com uma tampa de chaminé), tendo um pequeno orifício no topo do cone, onde foi fixado um tubo para passagem do gás. No cone foram fixadas duas metades de uma bóia circular do tipo “salva-vidas”, para que o conjunto possa flutuar, mantendo todo o cone e parte do tubo, submersos. Um cone de menor tamanho, escamoteável, foi adaptado ao conjunto para proteção do “bag” contra a ação de ventos fortes, meramente para evitar a ocorrência de qualquer dano ao mesmo (Figuras 4.18 e 4.19). O formato final deste coletor de biogás se assemelha ao sistema trifásico de separação de sólidos e coleta de biogás existente nos reatores UASB (reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo), o qual apresenta uma boa eficiência em conjunto com o defletor para recolher e coletar o biogás gerado no interior desses reatores.



FIGURA 4.18: Coletor de biogás.



FIGURA 4.19: Detalhe do tubo de passagem do gás montado no coletor de gás.

Na Figura 4.20, pode-se observar o coletor de gás instalado no ponto de amostragem mais próximo ao final da lagoa (saída). O coletor de biogás foi “ancorado” por meio de uma corda fixada nas margens da lagoa. A fixação do coletor de biogás se fez necessária, porque o mesmo é flutuante e a ação do vento o faria mudar de posição na superfície da lagoa.



FIGURA 4.20: Posicionamento do coletor de gás, com o “bag”acoplado para início de amostragem.

O deslocamento na lagoa foi feito por meio de um barco de alumínio, até o ponto de amostragem. Ao se aproximar o barco do ponto de amostragem tomou-se o cuidado de mover lentamente o barco, a fim de evitar perturbações elevadas na região. Após a parada do barco aguardava-se 5 minutos para a instalação do coletor e após o seu posicionamento correto era acoplado ao “bag” que tinha o seu registro aberto. Transcorrido o tempo de amostragem o registro do “bag” era fechado e desacoplado do coletor, para envio ao laboratório.

A amostragem era realizada em dois pontos da lagoa (descritos no item 4.6), um próximo ao final da lagoa e outro próximo ao início; o tempo de coleta do biogás era de 3 à 4 horas. A coleta do primeiro ponto foi realizada num dia e a do segundo ponto realizada no dia seguinte. Este procedimento foi repetido mensalmente. As análises foram realizadas por um laboratório contratado – TASQA Serviços Analíticos Ltda., localizado na cidade de Paulínia, São Paulo. Em cada amostra de gás coletada na ETEJ eram determinadas as concentrações de Dióxido de Carbono – CO₂ (ppm v/v), Oxigênio – O₂ (ppm v/v), Metano – CH₄ (ppm v/v) e Sulfeto de Hidrogênio – H₂S (mg/Nm³).

Ainda com o coletor posicionado no local foi medido o fluxo do gás transferido do meio líquido para a atmosfera, por meio da utilização de uma proveta preenchida com um volume inicial de água e montada com a boca para baixo, parcialmente submersa na lagoa para evitar a saída da água exatamente na direção do tubo de saída das bolhas do biogás (do coletor de biogás), de maneira que as bolhas liberadas no meio líquido entrassem na proveta. Depois de um determinado tempo, cronometrado, foi medido o volume de biogás, sendo este equivalente ao volume de água deslocado no interior da proveta. Estas variáveis foram utilizadas no cálculo do fluxo de biogás (Figura 4.21).



FIGURA 4.21: Medição das variáveis tempo e volume para auxílio no cálculo do fluxo de biogás.

Na Figura 4.22 estão apresentadas as dimensões do coletor de biogás, não sendo consideradas as dimensões dos flutuadores e da tampa de proteção do “bag”. É importante observar que em 29/07/08 foram alteradas as dimensões do tubo instalado no topo do cone.

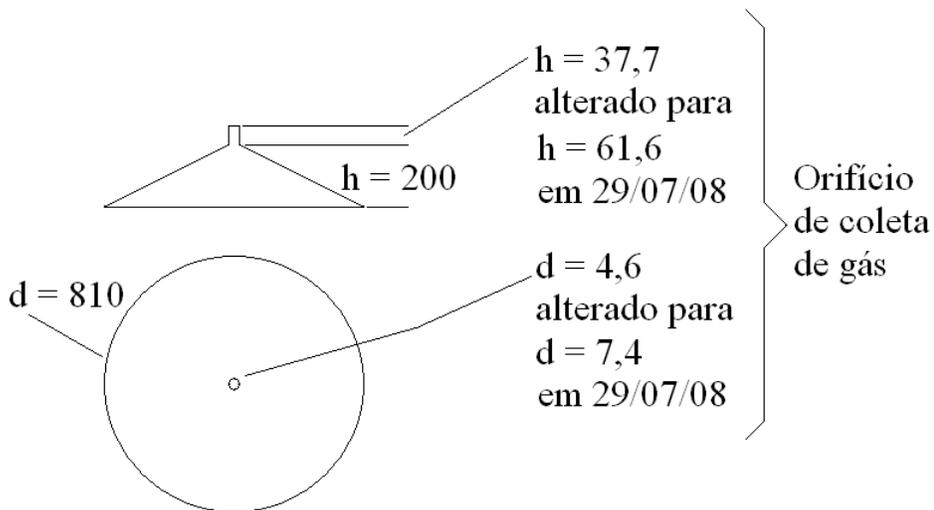


FIGURA 4.22: Dimensões do coletor de biogás, com todas medidas em milímetros.

4.5.2. Segunda Campanha de Amostragem do Biogás

Na segunda etapa de amostragem, foi inserido mais um equipamento para a coleta do biogás, porque se concluiu que o coletor de biogás utilizado na primeira campanha não possibilitava a quantificação dos fluxos difusivos, existentes entre o meio líquido e a atmosfera.

Nesta etapa, todas as coletas foram realizadas na lagoa de decantação n.º04, sendo que as amostras de biogás foram coletadas utilizando-se simultaneamente dois amostradores: o coletor de biogás descrito no item 4.5.1 e uma câmara estática.

A câmara estática, basicamente, é uma cúpula cilíndrica, construída em PVC. No seu interior foi instalada uma ventoinha para ser ligada durante o momento da coleta de cada amostra, a fim de promover uma boa homogeneização do ar em seu interior. A câmara era sustentada por um flutuador de poliuretano expandido fixado na parte externa, em toda a sua circunferência. As amostras eram retiradas do interior da câmara por meio de uma pequena mangueira do tipo cristal, com 5 centímetros de comprimento e diâmetro de 3 milímetros, instalada na câmara a meia altura, e com o auxílio de uma seringa de 60 mL (Figuras 4.23 e 4.24).



FIGURA 4.23: Câmara estática.



FIGURA 4.24: Seringa para retirada da amostra do interior da câmara.

Na figura 4.25, pode-se observar a câmara instalada em um dos pontos de amostragem, mais próximo à entrada da lagoa. Da mesma forma que para o coletor de gás, a câmara foi “ancorada”, para evitar o deslocamento com o vento.



FIGURA 4.25: Posicionamento da câmara para início de amostragem.

No posicionamento da câmara foram tomados os mesmos cuidados que para o coletor de gás, tanto no movimento do barco como na espera de 5 minutos para a instalação da câmara. Transcorrido o tempo necessário para a coleta do biogás, utilizava-se a seringa para retirar as amostras e transferi-las aos “bags” (idênticos aos descritos anteriormente), sendo então enviados ao laboratório.

As amostragens também eram realizadas em dois pontos da lagoa (próximo ao final da lagoa e próximo ao início, descritos no item 4.6), porém nesta etapa o coletor de gás e a câmara eram instalados juntos, e as coletas eram feitas em períodos de tempos que serão descritos no capítulo seguinte. Este procedimento foi repetido quinzenalmente. As análises foram realizadas por um laboratório contratado – ACQUALAB Laboratório e Consultoria Ambiental S/S Ltda., localizado na cidade de Jundiaí, São Paulo. Em cada amostra de biogás foram determinadas apenas as concentrações de CH_4 (ppm v/v).

Na Figura 4.26 estão apresentadas as dimensões da câmara estática, não sendo consideradas as dimensões do flutuador.

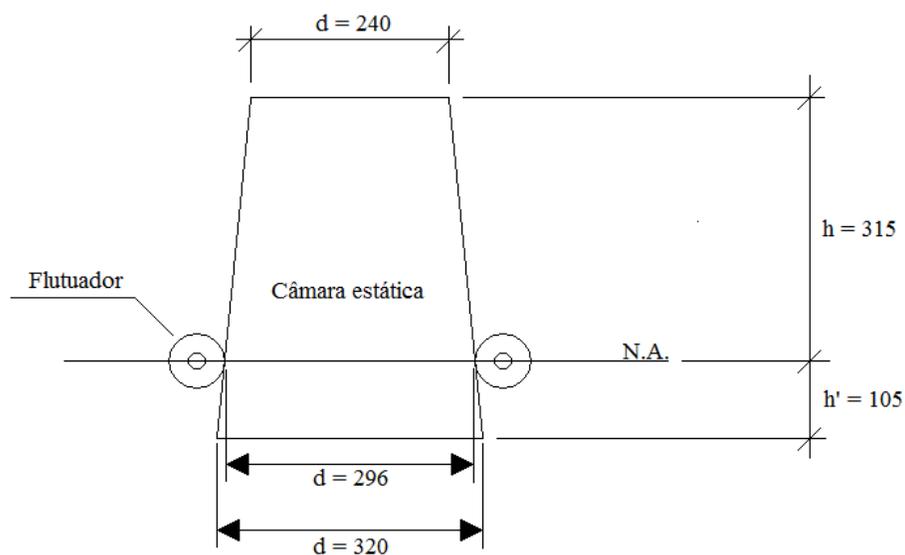


FIGURA 4.26: Dimensões da câmara estática, com as medidas em milímetros.

4.5.3. Adaptação da Câmara Estática para Coleta Somente do Fluxo Difusivo

Foi instalado um anteparo logo abaixo da abertura da câmara (Figuras 4.27 e 4.28), porém sem fechá-la, de maneira a impedir que as “bolhas” de biogás liberadas do fundo da lagoa de decantação alcançassem a atmosfera dessa câmara, de forma a possibilitar a amostragem somente do fluxo por difusão, pois a câmara ficava com água em seu interior até o flutuador e no nível acima deste existia uma camada de ar, sendo que na interface líquido-ar ocorria constantemente a transferência de massa por difusão. A câmara com o anteparo a partir daqui será chamada de câmara adaptada.



FIGURA 4.27: Vista de topo da instalação do anteparo na câmara.



FIGURA 4.28: Câmara adaptada.

4.6. Localização dos Pontos de Batimetria e de Amostragem nas Lagoas

Nas figuras 4.29 e 4.30 são apresentadas as localizações dos pontos de batimetria nas lagoas de decantação n.º03 e n.º04, respectivamente. No ano de 2008 (realização da primeira campanha de amostragem), a batimetria foi realizada em apenas 12 pontos ao longo da superfície da lagoa, já no ano de 2010 (realização da segunda campanha de amostragem) a batimetria foi realizada considerando-se 30 pontos.

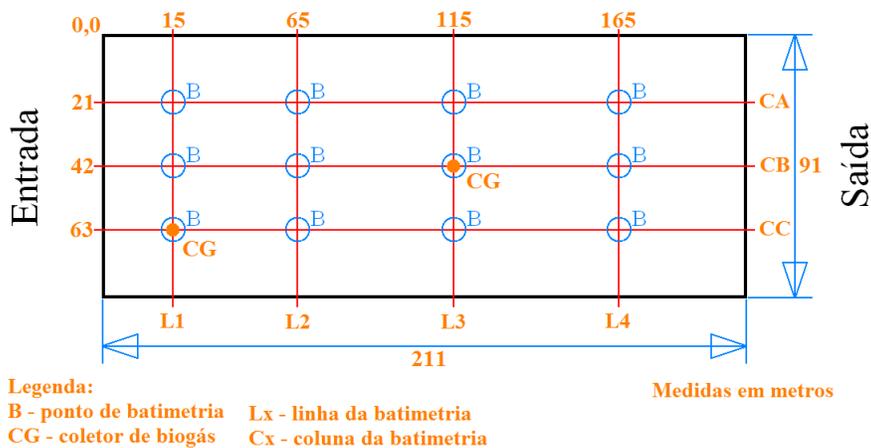


FIGURA 4.29: Pontos de batimetria e coleta do biogás na lagoa de decantação n.º03.

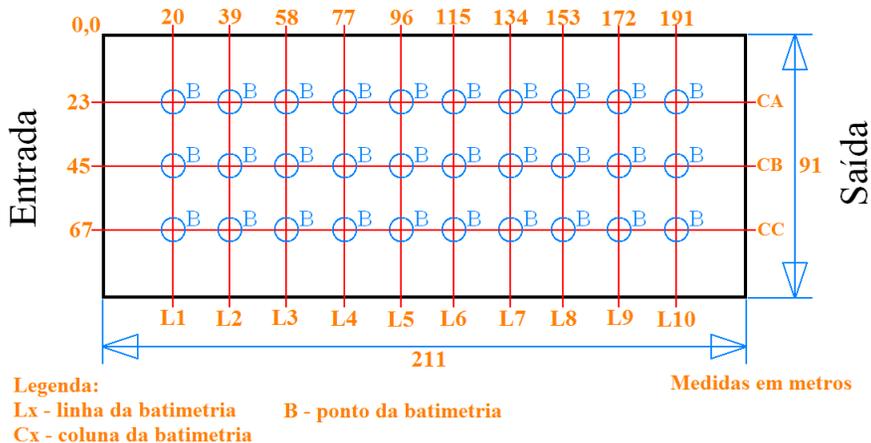


FIGURA 4.30: Pontos de batimetria na lagoa de decantação n.º04. As coordenadas “Cx” por “Lx” serão utilizadas para definir os pontos de amostragem, porque os mesmos variaram durante a segunda campanha.

4.7. Análises das Amostras – Cromatografia Gasosa

Segundo Marani (2007), a cromatografia gasosa foi utilizada pela primeira vez para análise de gases por Ramsay em 1905, na separação de gases e vapores. Devido à grande precisão, sensibilidade e linearidade conseguidas, a cromatografia foi utilizada no estudo de poluição urbana, e depois passou a ser também aplicada em estudos da atmosfera global, pela análise de amostras de ar limpo, onde as quantidades envolvidas dos chamados gases traço são muito pequenas.

Tanto o laboratório TASQA, quanto a ACQUALAB, utilizaram a cromatografia gasosa para a determinação das concentrações dos constituintes, nas amostras do biogás coletado.

O detector utilizado na análise do metano é o detector de ionização de chama (DIC), mostrado nas Figuras 4.31 e 4.32. O DIC é um detector altamente sensível a compostos orgânicos passíveis de queima e um dos mais utilizados na cromatografia gasosa.

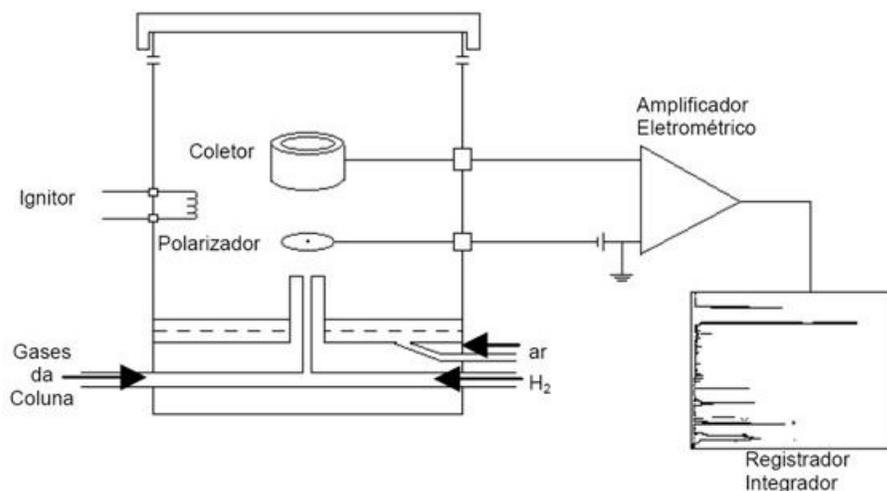


FIGURA 4.31: Diagrama do DIC – Detector de Ionização de Chama.

Fonte: adaptado de Ciola (1985)



FIGURA 4.32: Cromatógrafo 6820 GC System – Agilent Technologies.

A chama produzida na queima da amostra se encontra em um campo elétrico. Ao sair da coluna, o gás (componentes da amostra + gás de arraste) é misturado com hidrogênio e ar sintético e queimado em um queimador de aço inoxidável. Os compostos orgânicos produzem íons e elétrons que podem conduzir eletricidade através da chama. Um eletrodo polarizador sobre a chama coleta os íons formados, gerando uma corrente que é amplificada.

A concentração de metano foi determinada comparando-se a área obtida para o pico da amostra, com a área obtida no pico da amostra do padrão de metano. Cada análise cromatográfica tem duração (tempo de retenção) de 5 minutos.

4.8. Variáveis Estudadas

Em cada ponto de amostragem, também foram coletadas informações sobre algumas variáveis ambientais que poderiam influenciar na emissão de metano e também

necessárias para o cálculo do fluxo de metano. As variáveis de interesse foram a temperatura do ar (dentro e fora da câmara) e da água (a aproximadamente 15 centímetros de profundidade), a pressão atmosférica e a batimetria (manto de lodo no fundo das lagoas), tratada num capítulo à parte.

A pressão atmosférica foi medida na estação meteorológica “Weather Hawk” da “Ag Solve Monitoramento Ambiental”, com software de coleta de dados PC200W e software de apresentação dos dados “AgWeather”, instalada no prédio administrativo da ETE Jundiá. As temperaturas foram medidas por um termômetro analógico, com certificado de calibração.

4.9. Determinação dos Fluxos de Metano

A determinação do fluxo de metano emitido pelas lagoas de decantação foi calculada de maneira diferente para a câmara estática e para o coletor de biogás.

Para a câmara estática, a determinação foi feita a partir da variação temporal da concentração do metano no seu interior. A concentração de metano em uma amostra de gás pode ser escrita como a razão entre o número de moles de CH_4 (n_{CH_4}) e o número total de moles da mistura (n_t). O número de moles de uma substância presente na amostra é dado pela razão entre a massa da substância (m_{CH_4}) e sua massa molar (M_{CH_4}).

Segundo Marani (2007), adotando-se uma variação no número de moles de metano (Δn_{CH_4}), e aplicando-se a equação dos gases ideais ($PV = nRT$), pode-se escrever:

$$\frac{\Delta n_{CH_4}}{n_t} = \frac{\Delta m_{CH_4} \cdot R \cdot T}{M_{CH_4} \cdot P \cdot V} = \Delta x_{CH_4} \quad (4.1)$$

$$\Delta m_{CH_4} = \frac{\Delta x_{CH_4} \cdot P \cdot V}{M_{CH_4} \cdot R \cdot T} \quad (4.2)$$

sendo:

P: pressão total (atm)

V: volume total (litros)

M_{CH_4} : massa molar do metano (16,03 g/mol)

R: constante dos gases (0,082 atm L mol⁻¹ K⁻¹)

T: temperatura (K)

m_{CH_4} : massa de metano (g)

X_{CH_4} : concentração de metano (ppm v/v)

Admitindo-se que a variação do fluxo através da área A (m²) é constante durante um intervalo de tempo Δt , pode-se escrever o fluxo Φ_{CH_4} (em mgCH₄ m⁻² d⁻¹) como:

$$\Phi_{CH_4} = \frac{P.V.M_{CH_4}}{A.R.T} \frac{dx_{CH_4}}{dt} \quad (4.3)$$

A variável mais importante em (4.3) é “ dx_{CH_4}/dt ”, que é a derivada das medidas de concentração. Todas as demais variáveis foram medidas diretamente no momento da coleta. A grandeza “ dx_{CH_4}/dt ” é estimada a partir da regressão linear, considerando-se “ dx_{CH_4}/dt ” como o “b” em $x = x_0 + bt$, e o coeficiente de correlação “r” é uma medida da incerteza.

Esta determinação é válida somente para fluxos constantes. Como visto no capítulo 3 (Revisão Bibliográfica), no fluxo difusivo o metano produzido pela degradação do lodo em meio anaeróbio se difunde lentamente na água até atingir a superfície do líquido e ser transferido para a atmosfera por difusão, fluxo este aproximadamente constante.

No fluxo ebulitivo, a transferência de metano produzido pela degradação do lodo em meio anaeróbio ocorre por intermédio de bolhas. Este tipo de fluxo é aleatório e as

quantidades emitidas normalmente são maiores que no fluxo difusivo. O fluxo ebulitivo não pode ser considerado constante, portanto o fluxo médio, neste caso, tem que ser calculado a partir da diferença entre as concentrações inicial e final no interior da câmara.

Para o coletor de biogás, por sua configuração construtiva e por estar totalmente submerso, o volume de metano coletado representa somente o fluxo ebulitivo.

O volume de biogás coletado por esse amostrador foi considerado aquele volume de biogás transferido para a atmosfera em um determinado tempo, medido por meio da proveta (Figura 4.21). Do volume total é calculada a parcela somente do metano, por meio da concentração obtida na cromatografia gasosa realizada na amostra do gás analisada em laboratório. A partir da densidade calculada para as condições de pressão e temperatura locais, pode-se estimar o fluxo médio de metano (ebulitivo).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Introdução

No desenvolvimento deste trabalho procurou-se escolher pontos de amostragem que representassem as influências mais significantes sobre os fluxos de metano. Foram utilizadas as lagoas de decantação n.º03 e n.º04, por serem as lagoas que sempre apresentaram uma dificuldade maior na retirada do lodo de fundo. Com o desenvolvimento de soluções mais modernas e automatizadas de dragagem, foi possível aumentar a eficiência de remoção do lodo, ocorrendo uma diminuição expressiva na altura do manto de lodo, altura esta determinante nos fluxos de metano.

Foram realizadas duas campanhas de coletas. Na primeira campanha as coletas compreenderam os meses de fevereiro a agosto de 2008, sendo utilizado apenas o coletor de biogás. Na segunda campanha o período compreendido foi entre os meses de fevereiro a maio de 2010, porém para estas coletas foram utilizados o coletor de biogás e a câmara estática.

Como visto em capítulos anteriores os fluxos de metano podem ser classificados como difusivos ou ebulitivos. A partir dos resultados das concentrações do metano no biogás, amostrados pelo coletor de biogás, é possível representar somente os fluxos ebulitivos, enquanto que fluxo total calculado a partir das amostragens na câmara estática representam os fluxos ebulitivos e difusivos juntos. Com uma adaptação realizada na câmara estática se conseguiu determinar apenas a parcela dos fluxos difusivos.

5.2. Determinação das Concentrações do Metano nas Amostras Coletadas

5.2.1. Concentrações Determinadas pelo Laboratório TASQA

As análises das concentrações de metano, da primeira campanha, foram realizadas pelo laboratório da TASQA (Paulínia – SP), sendo baseadas no Método⁹ “EPA 3C”. Este método é utilizado para determinação do dióxido de carbono, metano, nitrogênio e oxigênio de fontes estacionárias. Um volume de amostra é injetado no cromatógrafo a gás, sendo determinadas as concentrações dos gases citados, por intermédio de um detector de ionização de chama e um integrador. A faixa linear de trabalho deste método é bastante ampla e a calibração é ajustada à concentração das amostras. O limite de detecção é da ordem de 10 ppmv.

TABELA 5.1: Concentração de metano nas amostras de biogás coletadas na lagoa de decantação n.º03, com o coletor de biogás, entre os meses de fevereiro à agosto de 2008.

Data Coleta	Identificação da coleta	Concentração metano (ppm-v) *	Localização do ponto de coleta na lagoa	Equipamento utilizado na coleta
28/02/08	C2	735.100	Saída	Coletor de biogás
02/04/08	C2	739.820	Saída	Coletor de biogás
03/04/08	C1	709.890	Entrada	Coletor de biogás
14/05/08	C1	600.440	Entrada	Coletor de biogás
15/05/08	C2	760.000	Saída	Coletor de biogás
18/06/08	C2	714.161	Saída	Coletor de biogás
19/06/08	C1	730.178	Entrada	Coletor de biogás
03/07/08	C2	894.586	Saída	Coletor de biogás
20/08/08	C1	144.917	Entrada	Coletor de biogás
21/08/08	C2	813.847	Saída	Coletor de biogás

Onde: * valor obtido pelo Método referência EPA 3C

⁹ United States – Environmental protection Agency – Technology Transfer Network Emission Measurement Center – Method 3C (CO₂, CH₄, N₂, O₂).

5.2.2. Concentrações Determinadas pelo Laboratório ACQUALAB

As análises das concentrações de metano, na segunda campanha, foram realizadas pelo laboratório da ACQUALAB, sendo baseadas no Método¹⁰ “ASTM D 1945”. Este método de teste padrão para análise de gás natural, por meio de cromatografia a gás é utilizado para determinação da composição química dos gases naturais e misturas gasosas, bem como a concentração de um ou mais componentes em uma mistura.

TABELA 5.2: Concentração de metano nas amostras de biogás, coletadas com a câmara estática e o coletor de biogás em 11/02/10, na lagoa de decantação n.º04.

Identificação da coleta	Concentração metano (ppm-v) *	Localização do ponto de coleta na lagoa	Equipamento utilizado na coleta
A1	4.460	Entrada	Câmara estática
A2	5.362	Entrada	Câmara estática
A3	422.018	Entrada	Coletor de biogás
A4	6.871	Saída	Câmara estática
A5	2.195	Saída	Câmara estática
A6	425.075	Saída	Coletor de biogás

Onde: * valor obtido pelo Método referência ASTM D 1945

TABELA 5.3: Concentração de metano nas amostras de biogás, coletadas com a câmara estática e o coletor de biogás em 25/02/10, na lagoa de decantação n.º04.

Identificação da coleta	Concentração metano (ppm-v) *	Localização do ponto de coleta na lagoa	Equipamento utilizado na coleta
A1	1.344	Entrada	Câmara estática
A2	1.867	Entrada	Câmara estática
A3	608.514	Entrada	Coletor de biogás
A4	16.326	Saída	Câmara estática
A5	3.399	Saída	Câmara estática
A6	598.088	Saída	Coletor de biogás

Onde: * valor obtido pelo Método referência ASTM D 1945

¹⁰ ASTM International – Standards Worldwide – ASTM D 1945 – Standard Test Method for Analysis of Natural Gas by Gas Chromatography.

TABELA 5.4: Concentração de metano nas amostras de biogás, coletadas com a câmara estática, diretamente da atmosfera (a 20 centímetros da superfície da lagoa) e com a câmara adaptada, em 11/03/10, na lagoa de decantação n.º04.

Identificação da coleta	Concentração metano (ppm-v) *	Localização do ponto de coleta na lagoa	Equipamento utilizado na coleta
A1	957	Entrada	Câmara estática
A2	17.228	Entrada	Câmara estática
A3	1.491	Entrada - atmosfera	-
A4	798	Saída	Câmara adaptada
A5	1.376	Saída	Câmara adaptada
A6	815	Saída - atmosfera	-

Onde: * valor obtido pelo Método referência ASTM D 1945

TABELA 5.5: Concentração de metano nas amostras de biogás, coletadas com a câmara estática, o coletor de biogás e diretamente da atmosfera (a 20 centímetros da superfície da lagoa) em 08/04/10, na lagoa de decantação n.º04.

Identificação da coleta	Concentração metano (ppm-v) *	Localização do ponto de coleta na lagoa	Equipamento utilizado na coleta
A1	777	Entrada - atmosfera	-
A2	885	Entrada	Câmara estática
A3	1.401	Entrada	Câmara estática
A4	775	Entrada	Câmara estática
A5	2.300	Entrada	Câmara estática
A6	388.028	Entrada	Coletor de biogás

Onde: * valor obtido pelo Método referência ASTM D 1945

TABELA 5.6: Concentração de metano nas amostras de biogás, coletadas com a câmara adaptada para coleta somente do fluxo difusivo, coletor de biogás e diretamente da atmosfera (a 20 centímetros da superfície da lagoa) em 22/04/10, na lagoa de decantação n.º04.

Identificação da coleta	Concentração metano (ppm-v) *	Localização do ponto de coleta na lagoa	Equipamento utilizado na coleta
A1	811	Entrada - atmosfera	-
A2	803	Entrada	Câmara adaptada
A3	881	Entrada	Câmara adaptada
A4	896	Entrada	Câmara adaptada
A5	958	Entrada	Câmara adaptada
A6	409.020	Entrada	Coletor de biogás

Onde: * valor obtido pelo Método referência ASTM D 1945

TABELA 5.7: Concentração de metano nas amostras de biogás, coletadas com a câmara adaptada para coleta somente do fluxo difusivo e o coletor de biogás em 06/05/10, na lagoa de decantação n.º04.

Identificação da coleta	Concentração metano (ppm-v) *	Localização do ponto de coleta na lagoa	Equipamento utilizado na coleta
A1	793	Entrada	Câmara adaptada
A2	830	Entrada	Câmara adaptada
A3	381.531	Entrada	Coletor de biogás
A4	769	Saída	Câmara adaptada
A5	799	Saída	Câmara adaptada
A6	263.543	Saída	Coletor de biogás

Onde: * valor obtido pelo Método referência ASTM D 1945

TABELA 5.8: Concentração de metano nas amostras de biogás, coletadas com o coletor de biogás em 13/05/10, escolhidos 6 pontos aleatórios, ao longo de toda a lagoa de decantação n.º04.

Identificação da coleta	Concentração metano (ppm-v) *	Localização do ponto de coleta na lagoa	Equipamento utilizado na coleta
A1	527.555	Entrada (lado oeste)	Coletor de biogás
A2	378.132	Entrada (lado leste)	Coletor de biogás
A3	13.977	Meio (lado oeste)	Coletor de biogás
A4	458.854	Meio (lado leste)	Coletor de biogás
A5	296.365	Saída (lado oeste)	Coletor de biogás
A6	445.206	Saída (lado leste)	Coletor de biogás

Onde: * valor obtido pelo Método referência ASTM D 1945

5.3. Determinação dos Fluxos de Metano a Partir das Amostras Coletadas

Na Tabela 5.9 estão apresentados os fluxos de metano, calculados a partir das concentrações obtidas nas análises de cromatografia, por métodos diferentes, em função dos equipamentos para captura do biogás utilizados (coletor de biogás ou câmara estática). No coletor de biogás os fluxos de metano foram calculados com base na equação 5.1, adaptada de Jennifer (2009), utilizando-se o resultado da medição da vazão de biogás, da concentração do biogás e da área de captação do coletor (memória de cálculo no Apêndice A). Os resultados dos fluxos determinados a partir da câmara estática foram calculados com base na equação 4.3, porém com diferentes desenvolvimentos, em função do tipo de fluxo (difusivo e ebulitivo), conforme discutido no capítulo 4 (Material e Métodos). De forma a subsidiar os cálculos descritos foram medidas algumas variáveis ambientais, cujos valores estão contidos nas tabelas pertencentes ao Anexo 01, onde se pode observar com maiores detalhes os resultados das amostragens.

$$\Phi_{CH_4} = X_{CH_4} \times d_{CH_4} \times \frac{Q_{CH_4}}{A} \quad (5.1)$$

sendo:

Φ_{CH_4} : fluxo de metano (g/m².d)

Q_{CH_4} : vazão do metano (L/d)

A: área (m²)

d_{CH_4} : densidade do metano (g/L)

X_{CH_4} : concentração de metano (ppm v/v)

TABELA 5.9: Fluxos de metano calculados para todas as datas e pontos de coleta.

Data Coleta	Fluxo de metano Calculado (mg CH₄/m²d)	Referência do Ponto de coleta	Lagoa de Decantação	Amostrador utilizado na coleta
28/02/08	15.134	Saída	LD 03	coletor de biogás
02/04/08	21.885	Saída	LD 03	coletor de biogás
03/04/08	6.914	Entrada	LD 03	coletor de biogás
14/05/08	6.717	Entrada	LD 03	coletor de biogás
15/05/08	13.755	Saída	LD 03	coletor de biogás
18/05/08	26.256	Saída	LD 03	coletor de biogás
19/05/08	6.281	Entrada	LD 03	coletor de biogás
03/07/08	26.519	Saída	LD 03	coletor de biogás
20/08/08	1.050	Entrada	LD 03	coletor de biogás
21/08/08	19.639	Saída	LD 03	coletor de biogás
11/02/10	945	Entrada	LD 04	câmara estática
11/02/10	6.003	Entrada	LD 04	coletor de biogás
11/02/10	-4.583	Saída	LD 04	câmara estática
11/02/10	4.389	Saída	LD 04	coletor de biogás
25/02/10	464	Entrada	LD 04	câmara estática
25/02/10	5.724	Entrada	LD 04	coletor de biogás
25/02/10	-13.767	Saída	LD 04	câmara estática
25/02/10	3.705	Saída	LD 04	coletor de biogás
11/03/10	15.557	Entrada	LD 04	câmara estática
11/03/10	590	Saída	LD 04	câmara adaptada
08/04/10	6.301	Entrada	LD 04	câmara estática
08/04/10	6.108	Entrada	LD 04	coletor de biogás
22/04/10	664	Entrada	LD 04	câmara estática adaptada
22/04/10	6.935	Entrada	LD 04	coletor de biogás
06/05/10	235	Entrada	LD 04	câmara estática adaptada
06/05/10	3.541	Entrada	LD 04	coletor de biogás
06/05/10	194	Saída	LD 04	câmara estática adaptada
06/05/10	1.611	Saída	LD 04	coletor de biogás
13/05/10	8.974	entrada oeste	LD 04	coletor de biogás
13/05/10	6.218	entrada leste	LD 04	coletor de biogás
13/05/10	198	meio lagoa oeste	LD 04	coletor de biogás
13/05/10	7.545	meio lagoa leste	LD 04	coletor de biogás
13/05/10	5.041	saída oeste	LD 04	coletor de biogás
13/05/10	6.058	saída leste	LD 04	coletor de biogás

5.4. Análise dos Fluxos de Metano Medidos

O metano é produzido pela digestão anaeróbia que ocorre no manto de lodo existente no fundo das lagoas de decantação. Parte deste metano é transferido ao meio líquido por difusão, que por sua vez é transferido do meio líquido para a atmosfera, no limite da interface das camadas líquido-gás, também por difusão. A outra parcela do metano produzido é transferida diretamente para a atmosfera por intermédio de bolhas liberadas no manto de lodo, de forma espontânea. Estas bolhas são resultantes do acúmulo existente no próprio manto de lodo de gases produzidos pela atividade das bactérias fermentativas e acidogênicas, principalmente pelas arqueas metanogênicas, produção essa que se inicia a nível molecular no interior de cada célula. A união dessas moléculas acaba formando bolhas microscópicas, que por coalescência formam microbolhas, e então bolhas maiores até que o volume de gases acumulado supere as forças de adesão que existe no interior do manto de lodo, provocando então o aparecimento de fluxos de bolhas de gases que rapidamente, em escoamento ascendente, atingem a superfície da lagoa de decantação. Esse processo todo descreve a formação do fluxo ebulitivo dos gases gerados.

O coletor de biogás, por permanecer totalmente submerso no momento da amostragem, captura apenas o biogás emitido na forma de bolhas, quantificando somente a parcela do fluxo ebulitivo.

A câmara estática permite além da captura do biogás em forma de bolhas (ebulitivo), a captura da parcela do fluxo difusivo, pois no interior da câmara estática ocorre a transferência de massa, por difusão, entre o meio líquido e o meio gasoso, existentes no interior da câmara estática no momento da amostragem. Conforme a literatura, a transferência de massa, por difusão, ocorre do meio de maior concentração para o de menor concentração, ou seja, não existe um único sentido do fluxo. Este pode ser bidirecional, indo no sentido líquido-gás, como no sentido gás-líquido. Neste trabalho entende-se que os fluxos deveriam ocorrer no sentido líquido-gás, devido à matéria orgânica presente no fundo das lagoas de decantação, mas por alguma alteração do ambiente característico e particular da câmara estática, ocorreram fluxos no sentido inverso, sendo neste caso representados por um número negativo, para diferenciação (Tabela 5.9).

Para determinação apenas do fluxo difusivo foi instalado um anteparo na câmara estática de maneira a impedir que as bolhas liberadas chegassem ao seu interior, permitindo apenas a ocorrência da transferência por difusão.

Marani (2007), em seu estudo, classificou os fluxos (difusivo e ebulitivo) a partir dos critérios de linearidade e de que a concentração inicial de gases estivesse próxima à concentração ambiente medida. Para ele, o fluxo difusivo ocorre, aproximadamente, de maneira constante, ao passo que o fluxo ebulitivo se dá de maneira esporádica e normalmente maior que o difusivo.

Na Figura 5.1 são mostrados os resultados de duas coletas realizadas por Marani (2007), onde pela linearidade em (a) foi determinado um fluxo difusivo e, em (b) foi determinado um fluxo ebulitivo.

Após uma avaliação crítica dos resultados obtidos por Marani (2007), é importante ressaltar um aspecto discordante quando o autor afirma que em (b) tem-se somente o fluxo ebulitivo, pois apesar deste apresentar níveis bem mais elevados de fluxos do que o difusivo, na interface líquido-gás ocorre a transferência de massa (por difusão ou convecção) a menos de uma condição de equilíbrio, o que não é o caso, portanto entendeu-se que em (b) os fluxos seriam totais (ebulitivo + difusivo).

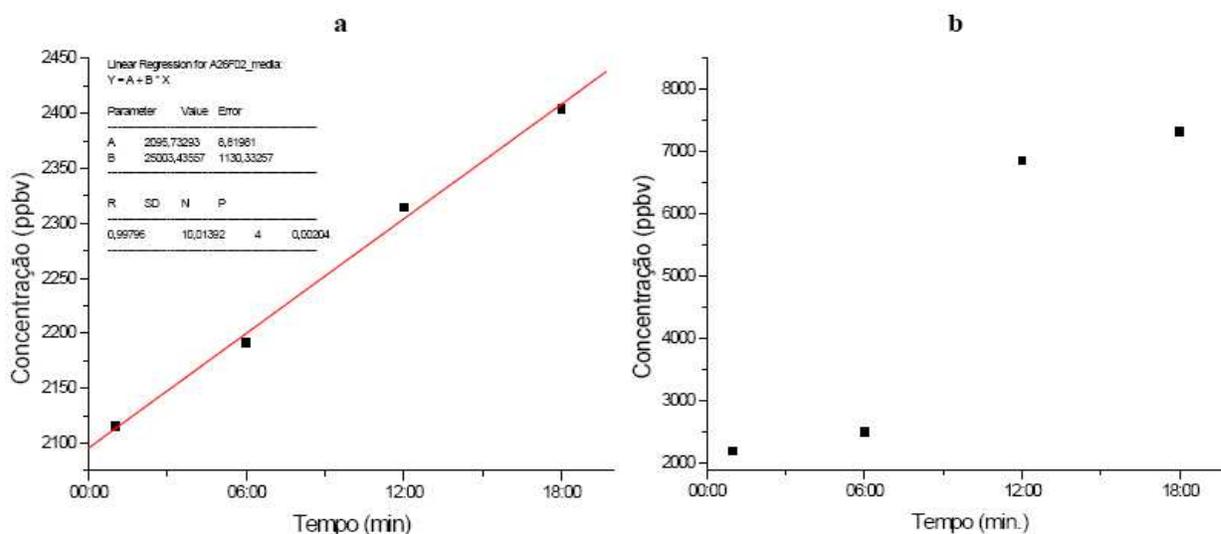


FIGURA 5.1: Variação temporal da concentração medida no interior da cúpula para (a) fluxos difusivos e (b) fluxos ebulitivos.

Fonte: Marani (2007)

Observando-se a Figura 5.1 fica claro a linearidade em (a), a concentração na atmosfera da cúpula vai sendo enriquecida em metano, lentamente e de maneira constante. Em (b) é possível observar que entre os instantes 6 minutos e 12 minutos ocorreu a liberação de uma ou mais bolhas, fazendo com que a concentração do metano na cúpula sofresse uma variação abrupta, quase triplicando o seu valor.

Nos estudos, de Rosa et al. (2000) a forma para determinação dos fluxos ebulitivos foi semelhante a utilizada no presente trabalho de pesquisa, no qual o autor utilizou funis para captura das bolhas (fabricados em cone de napa sintética, com armação de alumínio e diâmetro de 1 metro), acoplados a garrafas plásticas do tipo PET que armazenavam o biogás coletado, conforme observado na Figura 5.2.



FIGURA 5.2: Funil coletor de bolhas em sub-superfície.

Fonte: Rosa et al. (2000)

No trabalho de Rosa et al. (2000) amostrou-se o fluxo difusivo de gases com um aparato de conceito semelhante ao utilizado neste trabalho, porém variando os materiais e métodos empregados para a coleta. Os dispositivos utilizados (Figura 5.3) eram semelhantes a copos invertidos com um volume total de 75 mL e capazes de conter uma “bolha” de ar atmosférico submersa a pequena profundidade (cerca de 20 centímetros abaixo da superfície) com uma área de contato de $0,22 \text{ dm}^2$ ($0,0022 \text{ m}^2$), através da qual ocorre a difusão.



FIGURA 5.3: Câmaras de difusão acopladas a bóias.

Fonte: Rosa et al. (2000)

As câmaras, com diferentes formas construtivas, são as metodologias mais empregadas para este tipo de coleta de gás ou biogás, sendo utilizados em solos e em meios líquidos, como lagos, pântanos, lagoas, represas oriundas das hidrelétricas, etc.. Contudo, outros modelos têm surgido, como o utilizado por Rosa et al. (2000), sendo que o aspecto mais importante é definir corretamente o seu uso de maneira a causar a menor alteração ao meio estudado e procurando-se representar da melhor forma possível as diferentes condições encontradas no local de estudo, principalmente, porque, segundo Fearnside (2008), as medidas dos fluxos de metano têm sido realizadas por extrapolações a partir de poucas medidas diretas, em alguns pontos do local estudado, presumindo-se emissões médias por unidade de área.

No presente trabalho não foi diferente: os fluxos foram determinados a partir de alguns pontos pré estabelecidos nas lagoas de decantação n.º03 e n.º04, por meio dos amostradores e as respectivas área de coletas de gases, sendo então calculada a emissão total por extrapolação, para a superfície total das quatro lagoas de decantação.

Na Tabela 5.10 são apresentados os fluxos médios de metano, por ebulição (captados pelo coletor de biogás), por difusão (captados pela câmara estática adaptada com o anteparo) e total (calculado a partir da soma destes dois fluxos).

TABELA 5.10: Valores dos fluxos médios de metano do conjunto das lagoas de decantação n.º03 e n.º04.

Tipo de Fluxo avaliado	Fluxo médio de metano calculado (mg CH₄/m²d)	Equipamentos utilizados nas coletas
Ebulitivo	9.008	coletor de biogás
Difusivo	421	câmara estática adaptada
Total	9.429	---

Na Tabela 5.11, pode-se observar o fluxo médio total (ebulitivo + difusivo) coletado pela câmara estática. Nela, também são apresentados os valores dos fluxos totais medidos, pois as variações e as intercorrências foram significativas.

TABELA 5.11: Fluxo médio total (ebulitivo + difusivo) de metano medido na câmara estática nas diversas coletas realizadas.

Data Coleta	Fluxo de metano calculado (mg CH₄/m²d)
11/02/10	946
11/02/10	-4.583
25/02/10	464
25/02/10	-13.768
11/03/10	15.557
08/04/10	6.301
Fluxo médio	5.817

Obs.: No cálculo do fluxo médio foram excluídos os valores negativos, por se tratarem de uma absorção e não uma emissão.

Na Tabela 5.11 pode-se observar uma grande variação nos resultados, por dia de amostragem, indicando a ocorrência de um forte fator perturbativo das condições naturais de emissão, provocadas possivelmente pela instalação da câmara estática.

Segundo Silva (2006), a utilização de câmaras causa a perturbação das condições naturais de emissão, principalmente pelo confinamento de certa área superficial, que deixa

de sofrer a ação dos ventos, recebe um aquecimento diferenciado, ocorrendo inclusive um aumento da umidade na atmosfera interior da câmara, com relação à atmosfera exterior.

Dependendo da aplicação as câmaras são utilizadas com sucesso, como no estudo de Dueñas (1996), onde a câmara apresentou um desempenho satisfatório durante o experimento que, no entanto, tratava-se do estudo da emissão de metano em solos, ou seja, fluxos difusivos.

Nos dias 11 e 25 de fevereiro de 2010 observou-se as maiores variações nos fluxos calculados, inclusive se comparados aos fluxos medidos pelo coletor de biogás. Nestes dias além da utilização da câmara estática foi ligada, no momento da coleta, a ventoinha instalada no interior desta câmara e o tempo de permanência do equipamento no local da amostragem foi longo (aproximadamente 3 horas). Estes fatores foram responsáveis pelas alterações do meio, principalmente o funcionamento da ventoinha, que pode ter causado uma transferência de massa forçada por convecção, acelerando a absorção do metano pelo meio líquido e reduzindo o valor do fluxo de metano emitido para a atmosfera, a tal ponto que provocou uma redução tão elevada que tornou a concentração final do metano menor que a inicial, ou seja, prevaleceu neste caso um fluxo invasivo, da atmosfera para o líquido. O tempo de instalação da câmara (duração da coleta) foi então reduzido para 45 minutos e nos dois dias finais de campanha para 30 minutos, não sendo mais ligada a ventoinha até o final da campanha. No dia 11 de março de 2010 foi registrado um valor elevado de fluxo ($15.557 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2.\text{dia}$), mas pode ter sido ocasionado pelo desprendimento de uma placa de lodo do fundo da lagoa, elevando o fluxo de gases na região do material flotado, uma ocorrência normal neste tipo de unidade de tratamento, principalmente entre o início da lagoa e a sua metade. O resultado do dia 08 de abril, com a mínima perturbação da câmara estática, foi de $6.301 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2.\text{dia}$, valor bem próximo ao obtido por intermédio do coletor de biogás, $6.108 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2.\text{dia}$ (somente fluxo ebulitivo).

Aparentemente a câmara estática adaptada sofre influências bem menores, durante as medições dos fluxos somente por difusão, logicamente, respeitando-se um tempo pequeno de amostragem, menor que 1 hora e sem a ação das ventoinhas. O fluxo difusivo ocorre de forma lenta e constante, um aspecto importante que pode favorecer a utilização da câmara estática adaptada como um equipamento adequado a este tipo de amostragem

(difusiva). Com base nas determinações realizadas a partir da amostragem realizada em 22 de abril de 2010 foi calculado o fluxo (difusivo) por dois caminhos: a diferença entre a concentração final e a inicial de metano na atmosfera da câmara ($662 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2\text{d}$ – difusivo) e pela regressão linear ($665 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2\text{d}$ – difusivo), a partir de 4 amostragens realizadas em intervalos de 15 minutos. Foram então encontrados valores com uma diferença menor que 1%, o que implica numa ótima linearidade, caracterizando baixa perturbação do meio.

O fluxo total médio calculado foi de $9.429 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2\text{d}$. Os fluxos difusivos representaram valores bem menores que os fluxos ebulitivos, cerca de 5% do total. Esta é uma característica de locais onde a matéria orgânica fonte de metano fica acumulada sob uma alta coluna de água. Outros locais, como por exemplo, o cultivo de arroz, apresentam a predominância do fluxo difusivo, porque o metano produzido é o produto final da decomposição anaeróbia de compostos orgânicos existentes sob uma estreita lâmina d'água (AGOSTINETTO et al., 2002).

5.4.1. Comparativo dos Fluxos de Metano Medidos com os Fluxos Encontrados em Outros Trabalhos

Marani (2007), em seu estudo no Pantanal Sul-Matogrossense, nas oito campanhas realizadas ao longo dos anos de 2004 e 2005, encontrou fluxos difusivos que variaram de 1 a $146 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2\text{d}$, com um fluxo médio de $13,1 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2\text{d}$. Para os fluxos ebulitivos os valores foram maiores e com uma maior variabilidade, de 1,6 a $2.187 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2\text{d}$, com uma média de $279 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2\text{d}$. O fluxo ebulitivo representou mais que 95% do fluxo total.

Comparando-se os dados obtidos por Marani (2007) com os da tabela 5.10 pode-se perceber que os fluxos de metano nas lagoas de decantação da ETE Jundiá são mais intensos, o que era de se esperar, pois no interior das lagoas de decantação existe uma concentração maior de matéria orgânica lábil por área superficial. A participação do fluxo

ebulitivo para o trabalho de Marani (2007) e o presente estudo, são muito semelhantes, representando aproximadamente 95% do fluxo total.

Rosa et al. (2000) em seu inventário de emissões de gases do efeito estufa por represas pertencentes a hidrelétricas, encontrou uma variação muito grande de resultados entre os diferentes casos estudados e também, entre os diversos pontos de amostragem em uma mesma represa de hidrelétrica. Contudo, mas o que pode-se perceber é que, com relação ao metano, os fluxos ebulitivos foram normalmente maiores que os fluxos difusivos, porém as diferenças entre eles foi pequena.

Fearnside (2008), relatou que represas variam amplamente na quantidade de gases de efeito estufa emitidos. A amplitude das oscilações anuais de emissões seria reduzida ao longo do tempo até magnitudes muito pequenas. No entanto, medidas das concentrações de CH₄ na lâmina de água ao longo dos primeiros 10 anos em Petit Saut¹¹ mostraram um padrão diferente, com a continuidade de grandes oscilações e a existência de picos elevados nos valores obtidos.

A China também possui diversas áreas alagadas, segundo Ding et al. (2003). Entre os anos de 2001 e 2002 as áreas alagadas cobriam uma área de aproximadamente 94.000 km², excluindo-se lagos e várzeas, localizadas principalmente em Qinghai-Tibet Highland (~50%) e nordeste da China (~30%). Os fluxos medidos por Ding et al. (2003) entre 2001 e 2002 variaram de 0,16 a 54,6 mg CH₄/m²d, bem menos intensos que os medidos por Marani (2007) no Pantanal Sul-Matogrossense. Ding et al. (2003) não faz menção aos tipos de fluxos (ebulitivo e difusivo), mas como as amostragens foram feitas por uma câmara estática, com um tempo total de coleta da amostra de 30 minutos, presumi-se que o fluxo seja total. Ding et al. (2003) fizeram quatro coletas para cada amostragem e utilizaram a regressão linear para o cálculo dos fluxos, porém utilizaram um recurso na câmara de amostragem que não teve um bom resultado neste trabalho, o uso de ventoinhas em seu interior.

Czepiel et al.(1993), estudaram a emissão de metano e dióxido de carbono em uma planta de tratamento de esgoto por processo de lodo ativado de Durham, em New

¹¹ A Hidrelétrica de Petit Saut fica localizada na Guiana Francesa.

Hampshire, EUA. Os resultados dos fluxos obtidos pelos autores estão apresentados na tabela 5.12.

TABELA 5.12: Fluxos mínimos e máximos de metano em quatro etapas da planta de tratamento de esgoto de Durham.

Etapa do Tratamento	Fluxo de metano (mg CH ₄ /m ² d)	
	mínimo	máximo
Tanque de areia (aerado)	3,7	26,0
Tanque de areia (não aerado)	4,2	20,2
Tanque de tratamento secundário (aerado)	1,1	7,5
Tanque de detenção de lodo	6,9	86,0

Segundo Czepiel et al.(1993), o metano é gerado etapas dos sistemas de tratamento de esgoto de elevada DBO e baixa concentração de oxigênio, na entrada do afluente, nos decantadores primários, nos decantadores secundários, nos tanques de detenção de lodo e linhas de transferência de lodo. A presença de metano foi percebida em áreas de aeração mecânica, onde os gases dissolvidos foram retirados do líquido por difusão. Na planta de Durham, o metano gerado na entrada do afluente foi emitido nos desarenadores aerados, devido à turbulência causada pela vazão de ar. Algum CH₄ gerado no líquido não aerado também contribuiu para o total emitido nos desarenadores.

O metano gerado nos decantadores primários e no lodo de retorno foram retirados do líquido pela aeração nos tanques aerados. A emissão mais elevada ocorreu na entrada do decantador secundário e no ponto de retorno do lodo, decaindo ao longo do tanque (CZEPIEL et al.1993).

Ainda, segundo Czepiel (1993), o CH₄ gerado no armazenamento do lodo foi emitido no tanque de detenção do lodo (aerado), imediatamente após sua transferência. O fluxo máximo de metano (86 mg CH₄/m²d) foi medido na chegada do lodo no tanque de detenção (aerado) e o mínimo (6,9 mg CH₄/m²d), após 1 dia de permanência neste tanque.

Outros trabalhos quantificam as emissões de metano em cultivos de arroz e até na Antártica, porém apesar da diversidade de artigos não foi encontrado nenhum que apresentasse estudos sobre as emissões em lagoas de decantação, ou mesmo em lagoas anaeróbias, para uma comparação mais direta com os resultados obtidos no presente

trabalho. Em sistemas de tratamento de esgoto com a utilização de lagoas de estabilização (no caso, lagoas aeradas seguidas de lagoas de decantação), as lagoas de decantação desempenham papel semelhante aos digestores de lodo, só que abertos, pois nelas ocorre ainda a degradação, também de forma anaeróbia, da matéria orgânica remanescente das lagoas de aeração, implicando em fluxos de metano mais intensos.

Segundo Czepiel (1993), as lagoas de tratamento de esgoto e lodo são, também, fontes de emissão de metano que não têm sido avaliadas quantitativamente. Sistemas de tratamento utilizando lagoas de estabilização são utilizados mundialmente para o tratamento de esgoto, em diversas configurações, e requerem uma avaliação detalhada das emissões para uma estimativa mais exata dos seus impactos na quantificação nacional e mundial da emissão de metano na atmosfera.

Nos itens a seguir serão estudadas também as variações dos fluxos de metano, em relação às variações da temperatura, da pressão e do manto de lodo depositado no fundo das lagoas.

Outro fator de influência nos fluxos de metano é a profundidade, conforme observado por Zhu et al. (2007) em seu estudo nos pântanos Wolong e Tuanjie, na Antártica, no qual foi observada uma correlação direta entre os fluxos médios de CH_4 médios e a profundidade da água. Neste trabalho não foi observada esta influência, a qual esta mais relacionada aos fluxos difusivos e nas lagoas de decantação da ETEJ os fluxos difusivos representam 5% dos fluxos totais.

5.5. Influência da Temperatura nos Fluxos de Metano

Os fluxos de metano variam diretamente com a temperatura, o que inclusive realimenta o efeito, ou seja, maior efeito estufa, mais quente, maior temperatura mais fluxo emitido. Porém na prática, as variações de temperatura acompanhadas na ETEJ não foram expressivas. Na Figura 5.4 pode-se observar a pequena influência da temperatura nos fluxos.

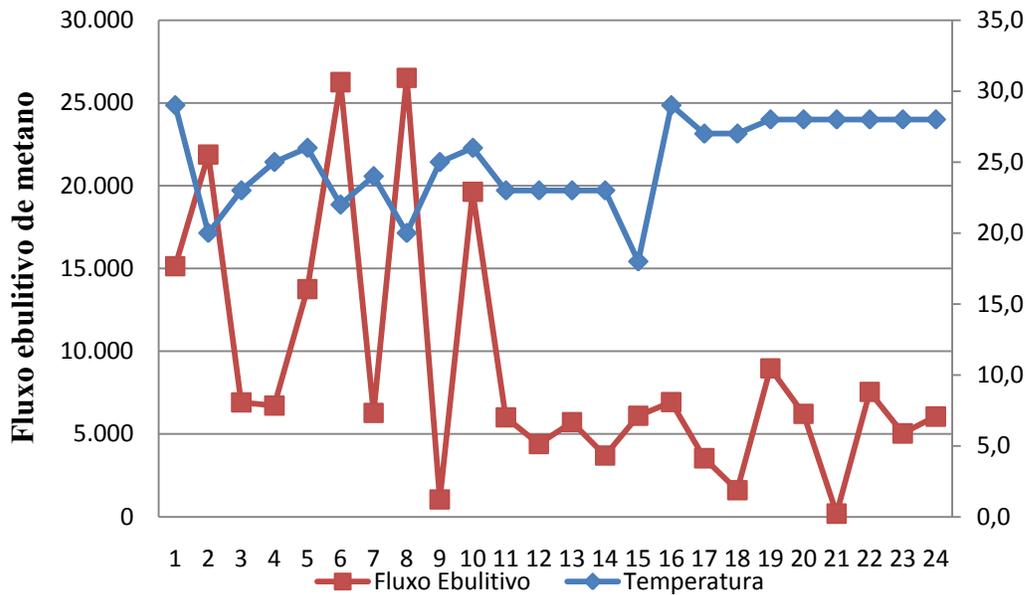


FIGURA 5.4: Fluxo ebulitivo e temperatura em cada amostragem. No eixo Y da esquerda se tem o fluxo de metano ebulitivo em mgCH4/m2.d, no eixo Y da direita a temperatura em °C, representadas em função das amostragens com o coletor de gás, numeradas de forma seqüencial.

5.6. Influência da Pressão Atmosférica nos Fluxos de Metano

Os fluxos de metano variam inversamente com a pressão, Porém, a sua variação é praticamente desprezível, pois no trabalho as profundidades variam de 1 a 3 metros no máximo. Com isso pôde-se considerá-la constante durante todo o período das campanhas.

5.7. Influência do Manto de Lodo nos Fluxos de Metano

Para análise da influência do manto de lodo nos valores dos fluxos de metano foi verificada a disposição do lodo no fundo das lagoas de decantação n.º03 e n.º04, utilizadas para as campanhas, em 2008 e 2010, respectivamente.

5.7.1. Análise da Altura do Manto de Lodo na Lagoa de Decantação n.º03

Em 2008 a batimetria foi realizada em 12 pontos no interior da lagoa, conforme detalhados na Figura 4.29. Os pontos foram distribuídos em toda área superficial da lagoa, sendo 3 colunas (CA, CB e CC), por 4 linhas (L1, L2, L3 e L4). Devido ao fato das batimetrias não terem sido realizadas em datas coincidentes com as coletas de biogás foram utilizadas aquelas com datas mais próximas destes eventos. Com os 3 valores (CA, CB e CC) encontrados por linha foi calculado um valor médio. Na Tabela 5.13 observam-se os dados médios da batimetria por data.

TABELA 5.13: Batimetrias realizadas durante a primeira campanha. Todas as medidas da altura do manto de lodo estão em centímetros. As alturas do manto de lodo em cada ponto de amostragem é o valor médio para cada linha e coluna, incluindo-se a média da lagoa por dia e a média geral para o período todo. As medidas foram realizadas durante a primeira campanha, para a lagoa de decantação n.º03.

Data da amostragem	Linhas				Média Lagoa
	L1	L2	L3	L4	
22/02/2008	432	220	66	94	203
04/04/2008	382	140	103	85	178
21/05/2008	396	269	141	107	228
20/06/2008	395	164	96	96	188
04/07/2008	402	140	69	79	173
22/08/2008	408	86	50	71	154
Média	403	170	88	89	Geral = 187

Quanto menor a altura do manto de lodo, melhor a condição operacional da lagoa de decantação, pois o tempo de detenção hidráulica fica maior e próximo do valor de projeto, implicando em menor velocidade do líquido em seu interior, propiciando melhores condições de sedimentação da partícula (ou floco biológico). O fato do manto de lodo não estar muito próximo da superfície também ajuda a minimizar as perdas de sólido, por arraste, pelo efluente tratado da ETEJ.

Na Tabela 5.13 p \hat{o} de-se verificar que as condi \tilde{c} oes desta lagoa estavam cr \hat{u} ticas, porque a distribui \tilde{c} ao n \hat{a} o estava uniforme, registrando-se uma altura elevada para o manto de lodo nas proximidades da sa \acute{i} da da lagoa, provocando um condi \tilde{c} ao operacional desfavor \hat{a} vel. Na Figura 5.5 podemos observar de maneira mais clara esta condi \tilde{c} ao.

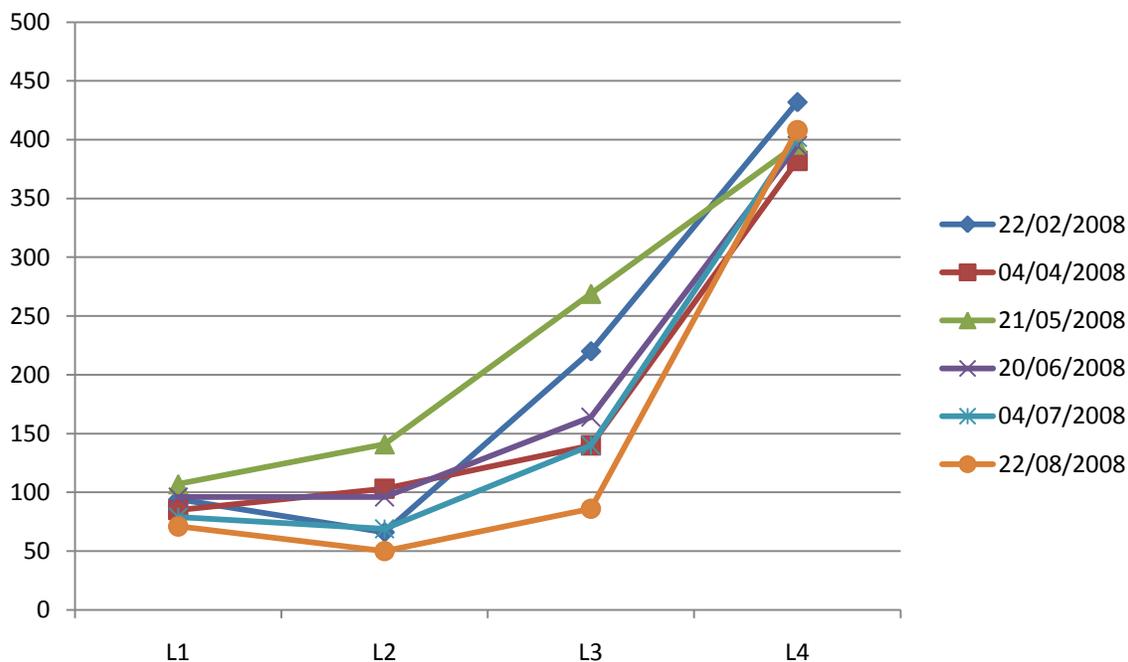


FIGURA 5.5: Altura do manto de lodo em centímetros, distribuído por linha, nas datas descritas na legenda. A linha 15 está do lado da saída da lagoa, ao passo que a linha 165 está do lado da entrada.

5.7.2. Análise da Altura do Manto de Lodo na Lagoa de Decantação n.º04

Em 2010 a batimetria passou a ser realizada em 30 pontos no interior da lagoa, conforme foi apresentado na Figura 4.30. Os pontos eram uniformemente distribuídos em toda área superficial da lagoa, sendo 3 colunas (CA, CB e CC), por 10 linhas (de L1 à L10). Da mesma forma que na primeira campanha as batimetrias não foram realizadas em datas coincidentes com as coletas de biogás, portanto foram utilizadas aquelas com datas mais

próximas. Nas Tabelas 5.14 a 5.17 são apresentadas as batimetrias realizadas durante a segunda campanha.

TABELA 5.14: Altura do manto de lodo (centímetros) nos 30 pontos de medição. Amostragem realizada na lagoa de decantação n.º04, em 03/02/2010.

Coluna	Linha									
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
A	104	112	107	204	210	164	191	325	254	252
B	164	131	215	227	138	154	233	231	227	232
C	206	232	233	175	181	204	261	326	227	255
Média Linha	158	158	185	202	176	174	228	294	236	246
Média Lagoa	206									

TABELA 5.15: Altura do manto de lodo (centímetros) nos 30 pontos de medição. Amostragem realizada na lagoa de decantação n.º04, em 02/03/2010.

Coluna	Linha									
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
A	103	76	104	228	123	197	232	280	274	272
B	96	132	109	206	170	199	249	197	223	234
C	189	166	200	237	266	220	307	272	278	357
Média Linha	129	125	138	224	186	205	263	250	258	288
Média Lagoa	207									

TABELA 5.16: Altura do manto de lodo (centímetros) nos 30 pontos de medição. Amostragem realizada na lagoa de decantação n.º04, em 07/03/2010.

Coluna	Linha									
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
A	160	90	196	253	200	150	158	254	240	198
B	120	140	200	240	210	160	196	240	216	220
C	194	224	280	215	195	150	215	366	235	208
Média Linha	158	151	225	236	202	153	190	287	230	209
Média Lagoa	204									

TABELA 5.17: Altura do manto de lodo (centímetros) nos 30 pontos de medição. Amostragem realizada na lagoa de decantação n.º04, em 06/05/2010.

Coluna	Linha									
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
A	23	53	135	303	220	160	209	200	320	336
B	77	106	206	213	177	227	260	314	267	334
C	120	216	203	178	185	224	275	339	281	347
Média Linha	73	125	181	231	194	204	248	284	289	339
Média Lagoa	217									

Observando as Tabelas 5.14 a 5.17 pode-se verificar que os valores da média geral da espessura do manto de lodo em cada um dos dias de amostragem estão satisfatórios, ou seja, um valor máximo de 217 centímetros e portanto uma lâmina d'água de 233 centímetros, o que resulta em um tempo de detenção hidráulica previsto em projeto (um dia), com uma remota chance de arraste de sólido para a saída. Inclusive neste período, a distribuição do lodo na lagoa foi mais uniforme (Figura 5.6) do que aquele verificado na lagoa n.º03 durante a primeira campanha.

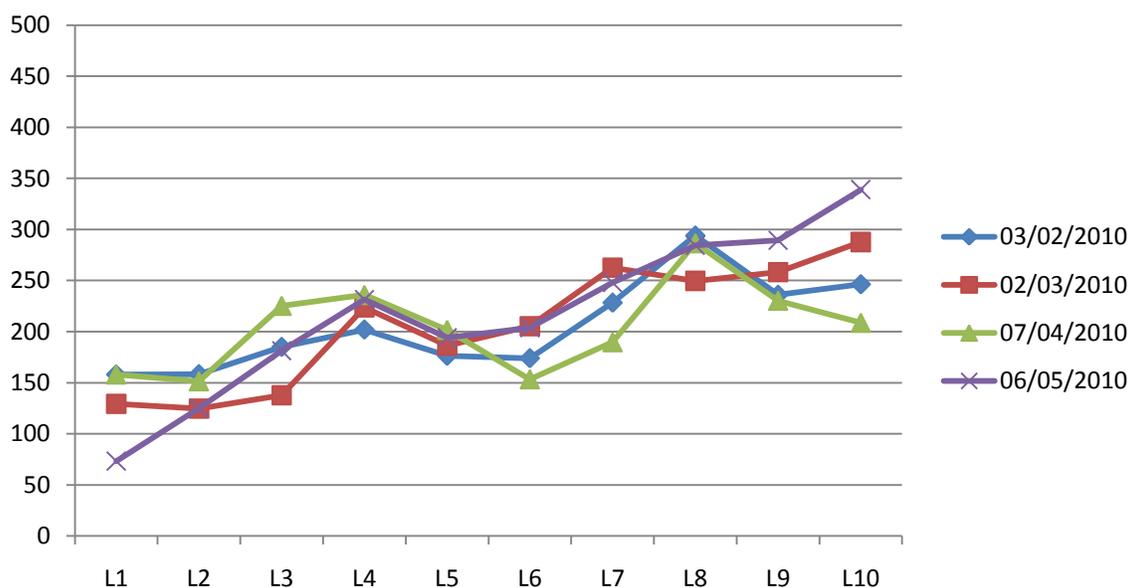


FIGURA 5.6: Altura do manto de lodo em centímetros, distribuído por linha, nas datas descritas na legenda. A linha L1 está do lado da entrada da lagoa, ao passo que a linha L10 está do lado da saída.

Nas Figuras 5.7 à 5.10 foram representados espacialmente os pontos das batimetrias descritos nas Tabelas 5.14 à 5.17, para a melhor visualização da distribuição do lodo no interior da lagoa de decantação n.º04.

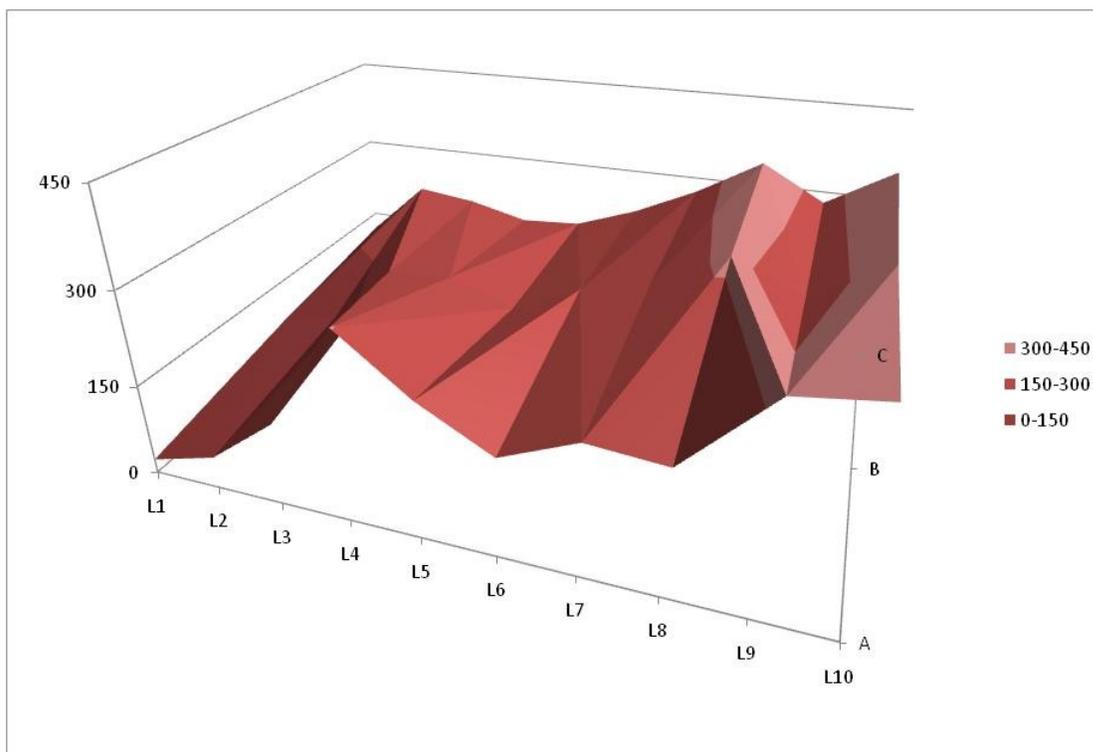


FIGURA 5.7: Distribuição do manto de lodo no interior da lagoa de decantação n.º04, com a altura do manto em centímetros, segundo a batimetria realizada em 03/02/2010 (Tabela 5.14). A linha “L1” está próxima da entrada da lagoa, enquanto “L10” está próxima da saída.

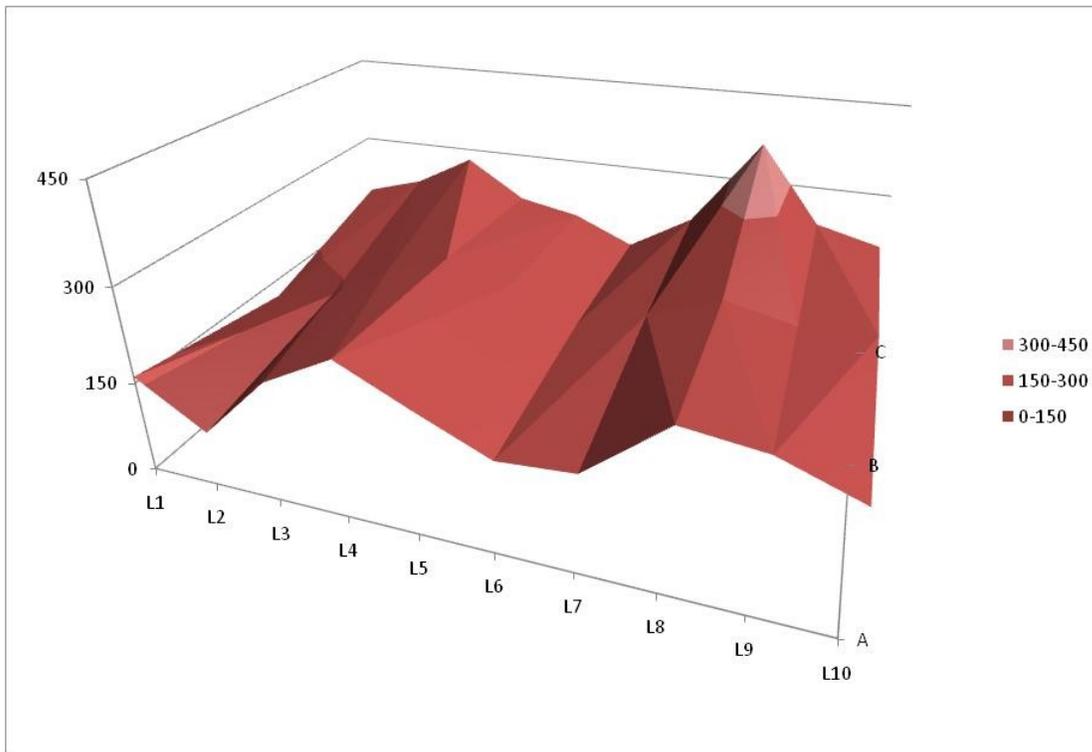


FIGURA 5.8: Distribuição do manto de lodo no interior da lagoa de decantação n.º04, com a altura do manto em centímetros, segundo a batimetria realizada em 02/03/2010 (Tabela 5.15). A linha “L1” está próxima da entrada da lagoa, enquanto “L10” está próxima da saída.

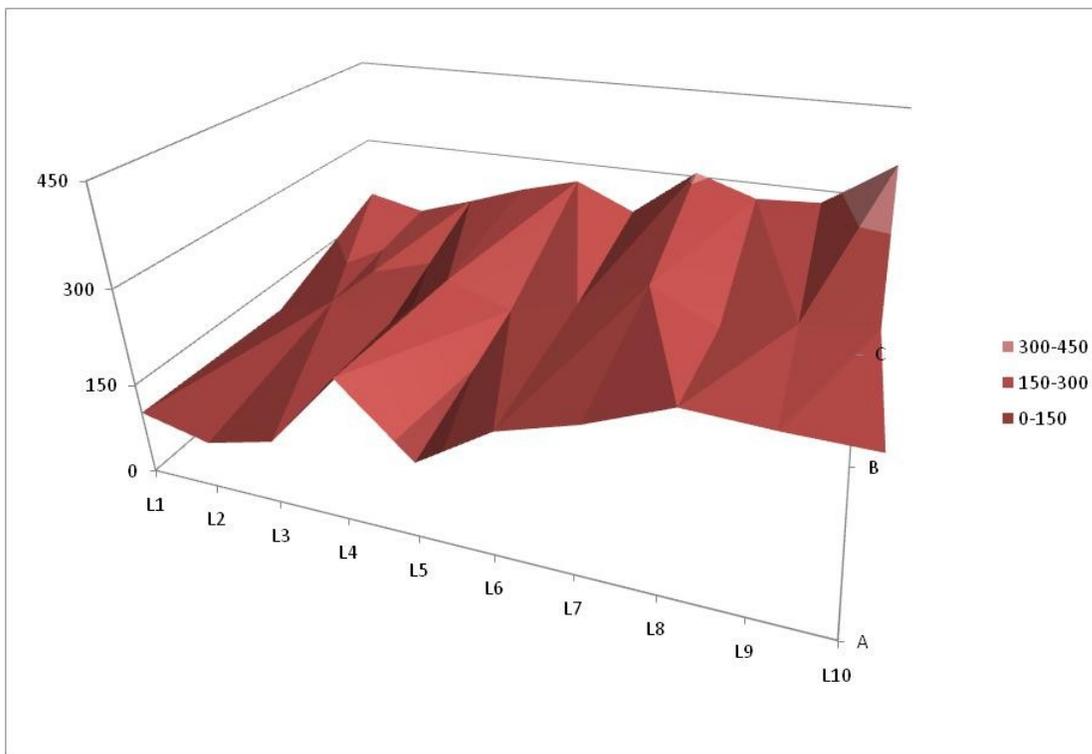


FIGURA 5.9: Distribuição do manto de lodo no interior da lagoa de decantação n.º04, com a altura do manto em centímetros, segundo a batimetria realizada em 07/04/2010 (Tabela 5.16). A linha “L1” está próxima da entrada da lagoa, enquanto “L10” está próxima da saída.

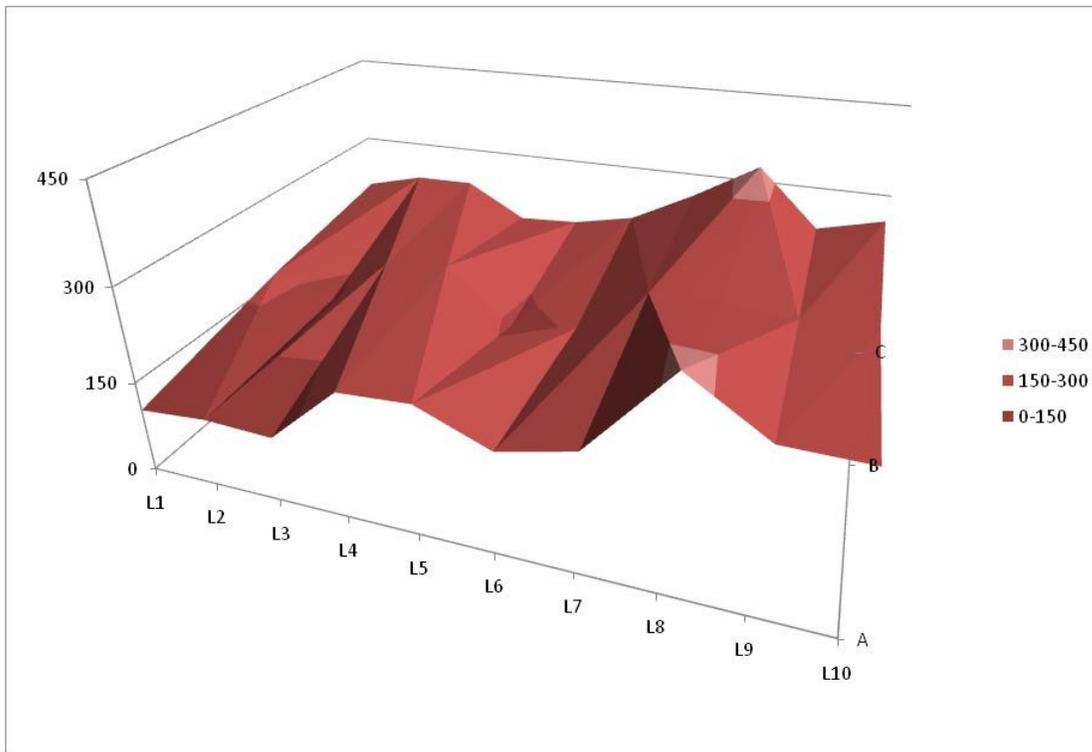


FIGURA 5.10: Distribuição do manto de lodo no interior da lagoa de decantação n.º04, com a altura do manto em centímetros, segundo a batimetria realizada em 06/05/2010 (Tabela 5.17). A linha “L1” está próxima da entrada da lagoa, enquanto “L10” está próxima da saída.

5.7.3. Verificação do Fluxo de Metano e a Altura do Manto de Lodo no Ponto de Amostragem

Foram utilizados apenas os fluxos medidos com o coletor de biogás (ebulitivos), devido ao maior número de amostragens realizadas e, também, porque as amostragens com este equipamento ocorreram nas lagoas de decantação n.º03 e n.º04. Este procedimento não afeta os resultados, pois os fluxos ebulitivos representam mais de 95% dos fluxos totais.

Na Tabela 5.18 estão correlacionados os fluxos ebulitivos de metano com a espessura do manto de lodo, na linha da lagoa onde foi realizada a coleta do biogás. Na Figura 5.11 está representado graficamente os dados da Tabela 5.18.

TABELA 5.18: Todas as medidas da altura do manto de lodo estão em centímetros. Estão representadas 24 medições de fluxo ebulitivo realizados nas duas campanhas de coletas, nas lagoas de decantação n.º03 e n.º04.

Ponto de Amostragem	Fluxo de metano calculado (mg CH ₄ /m ² d)	Altura do manto de lodo (cm)
1	15.134	432
2	21.885	382
3	6.914	103
4	6.717	141
5	13.755	396
6	26.256	395
7	6.281	96
8	26.519	402
9	1.050	50
10	19.639	408
11	6.003	131
12	4.389	227
13	5.724	132
14	3.705	197
15	6.108	140
16	6.935	151
17	3.541	106
18	1.611	314
19	8.974	203
20	6.218	135
21	198	185
22	7.545	220
23	5.041	275
24	6.058	209

O coeficiente de correlação (Pearson) entre os fluxos ebulitivos de metano e a altura do manto de lodo para as amostragens da Tabela 5.18 ficou em 0,7698. Segundo os critérios para análise do valor de correlação, Este valor representa uma forte correlação (maior que 0,7).

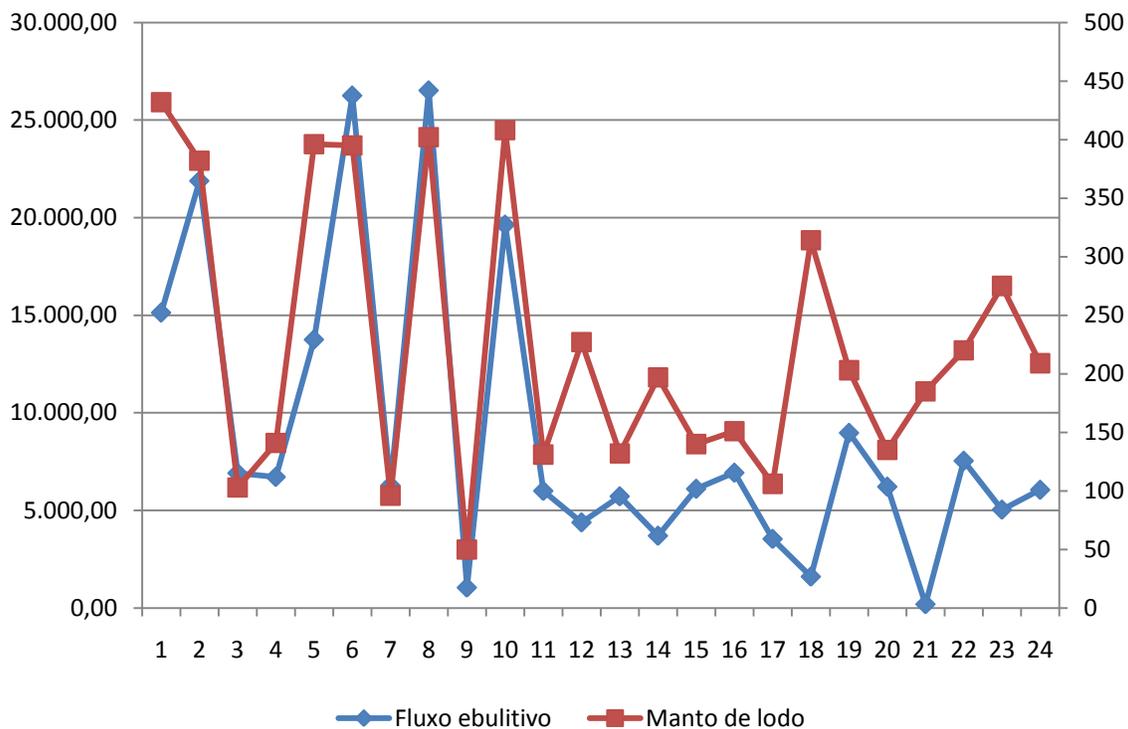


FIGURA 5.11: Fluxos ebulitivos de metano (eixo principal) e a altura do manto de lodo (eixo secundário).

Observando a Figura 5.11, pode-se verificar a boa correlação entre a emissão de metano e a altura do manto de lodo, com poucos pontos de divergência como as amostragens 12, 13, 14 e 15, nas quais observa-se uma correlação indireta. Na amostragem 21, também houve uma divergência, mas é importante lembrar nesta data ocorreu algum problema com a amostra/análise, pois o resultado ficou muito diferente dos valores normalmente encontrados.

Analisando as Figuras 5.5 e 5.6 observa-se a mudança na disposição do manto de lodo, que se acumulava mais no final das lagoas, deixando o manto bastante elevado naquela região, intensificando os fluxos de metano. Com a maior eficiência de dragagem

para desidratação, conseguiu-se diminuir o manto de lodo, deixando a sua distribuição mais uniforme na lagoa, sendo observada uma diminuição dos fluxos de metano na região.

5.8. Estimativa de Emissão de Metano para a ETE Jundiaí

As estimativas de emissão de metano foram feitas a partir dos fluxos médios e das áreas das lagoas de decantação. Apesar das amostragens terem sido realizadas em poucos pontos da lagoa e aplicarem-se os resultados por toda a lagoa, por extrapolação, as estimativas ajudam a indicar a contribuição de metano e sua influência no balanço atmosférico. Segundo Marani (2007), a avaliação da importância dos componentes difusivo e ebulitivo do fluxo de metano, bem como de seus comportamentos em diferentes ambientes também se faz necessária para diminuir a incerteza presente nas estimativas.

Considera-se a separação dos fluxos ebulitivos e difusivos, porque dependendo do ambiente, os fluxos ebulitivos podem não ocorrer sempre, já o fluxo difusivo ocorre constantemente. Neste caso, é importante considerar a razão de ocorrência desse fluxo. Nas lagoas de decantação estudadas os fluxos ebulitivos ocorreram em todas as amostragens das duas campanhas, portanto poderemos considerar a razão de 100% de ocorrências. O que se observa nas lagoas da ETEJ é que os fluxos ebulitivos diminuem em alguns pontos, em contra partida ocorre com certa frequência o desprendimento de placas de lodo, originários do manto de lodo, ocasionando no mesmo instante um grande aumento no fluxo ebulitivo nesta região.

Devido à menor variação das amostragens e a menor interferência no meio foi utilizado o fluxo médio calculado na Tabela 5.10 para o cálculo total do metano emitido pelas quatro lagoas existentes na ETE Jundiaí, apresentado na Tabela 5.19.

TABELA 5.19: Estimativa da emissão diária e anual de metano pelas 4 lagoas de decantação existentes na ETEJ.

Fluxo médio de metano calculado (mg CH ₄ /m ² d)	Área superficial De uma lagoa (m ²)	Área superficial total das 4 lagoas de decantação (m ²)	Emissão diária de metano (kgCH ₄ /dia)	Emissão anual de metano (MgCH ₄ /ano)
9.429	19.201	76.804	724	264

Na figura 5.12 são apresentadas as emissões anuais de metano, porém os dados não englobam as emissões por estações de tratamento de esgoto. Segundo Czepiel et al.(1993), as plantas de tratamento de esgoto eram responsáveis por 5% do total da emissão de metano no mundo ou de 20 a 25 Tg CH₄/ano. Segundo o relatório do IPCC (2007), no ano de 2007 o tratamento de esgoto já era responsável pela emissão de 30 a 40 Tg CH₄/ano.

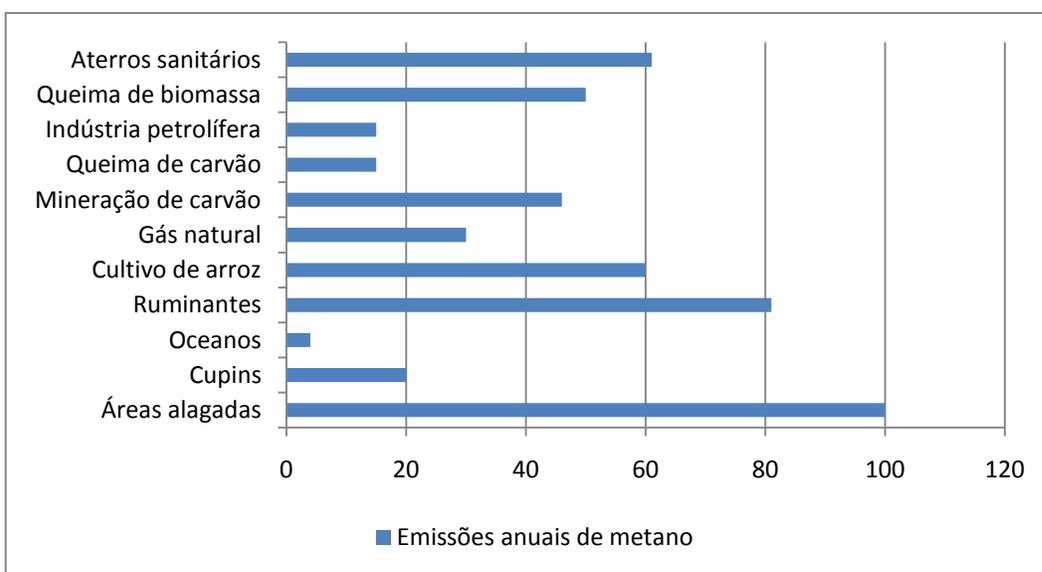


FIGURA 5.12: Emissões anuais de metano por fontes, em TgCH₄.

Fonte: Adaptada de Wuebbles e Hayhoe, 2002.

Em 2008 a EPA¹² divulgou que nos Estados Unidos a emissão de metano pelo tratamento de esgoto chega a 8,84 Tg CH₄/ano.

¹² EPA – Environmental Protection Agency – US – no site: <http://epa.gov/methane/sources.html>

Segundo Czepiel et al.(1993), o total de metano emitido para a atmosfera na ETE de Durhan (sistema de tratamento por lodo ativado) foi de 0,43 Mg CH₄/ano, valor abaixo da emissão calculada para as lagoas de decantação da ETE Jundiaí. Contudo, se for feita uma correlação com a carga orgânica tratada, os valores ficam mais próximos, como pode ser visto na Tabela 5.20.

TABELA 5.20: Comparativo da emissão de metano nas estações de tratamento de esgoto de Jundiaí e Durhan, em função da carga orgânica tratada.

Estação de Tratamento de Esgoto	Vazão afluente (m ³ /d)	DBO (mg/L)	Carga diária (Mg DBO/d)	Eficiência de remoção (%)	Emissão diária de metano (kg CH ₄ /d)	Emissão de metano/carga DBO tratada (kg CH ₄ /Mg DBO)
Durhan	3.000	250	0,75	94	1,2	1,60
Jundiaí	90.684	363	32,92	93	720,0	21,87

Nos cálculos para a ETE Jundiaí foram utilizadas as vazões e as DBO diárias de janeiro de 2008 até abril de 2010, período que abrange as coletas das duas campanhas.

Segundo Fearnside (2008), uma pergunta fundamental no cálculo de emissões de gás de efeito estufa de represas de hidrelétricas, assim como para outros tipos de mudanças antropogênicas é se as emissões são “adicionais” àquelas que teriam ocorrido na ausência da intervenção. Este não só é o princípio que guia ações de mitigação sob o Protocolo de Kyoto (i.e., de diminuir emissões líquidas) como também é a base para entender o papel de fontes novas que acrescentam às emissões humanas. Por exemplo, contabilizar todas as emissões de CO₂ de uma represa como adicionais ignora o fato que grande parte de qualquer CO₂ presente na água do rio, sem a barragem, teria sido emitida da mesma forma.

Baseado no princípio da adicionalidade, proposto por Fearnside (2008), pode-se concluir que antes da construção da ETE de Jundiaí todo o esgoto da cidade era lançado “in natura” nas águas do rio Jundiaí, o que tornava-o completamente poluído e sem a presença de oxigênio dissolvido, condição ideal para o desenvolvimento da digestão anaeróbia, resultando na geração de metano e sua emissão para a atmosfera. Portanto, parte do (ou todo) metano emitido na ETE Jundiaí (e em outras ETE) não representa uma contribuição adicional ao efeito estufa. Além disso, a ausência da ETE Jundiaí traria condições de

extrema adversidade ao rio Jundiaí, onde o impacto resultante não só provocaria efeitos negativos a todo o ecossistema envolvido, mas também um prejuízo ambiental e social de difícil quantificação, inclusive o carbono orgânico lançado no rio, provavelmente iria se tornar metano, enquanto que na ETEJ, boa parte dele é transformado em CO₂, com conseqüente menor impacto.

Segundo Hellmund e Smith (2006), são muito importantes os caminhos verdes (assim chamados por eles) para se chegar a recuperação de áreas degradadas e a ETEJ é um destes caminhos, bem como as demais ETE que estão sendo construídas ao longo do percurso e da bacia do rio Jundiaí e que em breve o trarão a uma classificação de menor poluição.

Este raciocínio ajuda na compreensão da necessidade das construções das estações de tratamento de esgoto, mas a busca pela redução dos impactos ambientais gerados por algum processo dentro do sistema, mesmo que mínimos, tem que ser um objetivo constante.

5.9. Estimativa do Potencial de Produção de Energia a partir do Metano

Há muito tempo o metano tem sido vislumbrado como um combustível com grande potencialidade de utilização (McGEER e DURBIN, 1981) e neste trabalho foi analisado o potencial de recuperação do metano para geração de energia elétrica. O potencial energético do biogás é dado em função da quantidade de metano contida no gás, o que determina o seu poder calorífico. Na Tabela 5.21 é apresentada uma composição típica média do biogás, proveniente de diferentes resíduos orgânicos.

TABELA 5.21: Composição típica média do biogás, proveniente de diferentes resíduos orgânicos.

Biogás	Porcentagem (%)
Metano (CH ₄)	40 – 75
Dióxido de carbono (CO ₂)	25 – 40
Nitrogênio (N)	0,5 – 2,5
Oxigênio (O)	0,1 – 1
Ácido Sulfúrico (H ₂ S)	0,1 – 0,5
Amoníaco (NH ₃)	0,1 – 0,5
Monóxido de carbono (CO)	0 – 0,1
Hidrogênio (H)	1 – 3

Fonte: Adaptada de Castanon (2002) apud Salomon e Lora (2005)

No presente estudo foram determinados os fluxos e as emissões somente do metano presente no biogás, e dessa forma foi calculado o potencial de produção de energia. Para o máximo aproveitamento do metano emitido nas quatro lagoas de decantação, todas deveriam ser cobertas permitindo a contenção e a recuperação do mesmo. Porém isto não seria possível devido à característica do processo, no qual existe a necessidade de remoção do lodo depositado no fundo das lagoas. Neste caso, a cobertura poderia ser parcial e como o “foco” principal de dragagem é a parte final das lagoas não haveria a necessidade da instalação de coberturas móveis.

A dragagem permanente da lagoa ocorre no 1/3 final da mesma, sendo possível a cobertura de 65% da lagoa, resultando, na recuperação máxima de 65% do metano emitido. Na verdade, a recuperação seria menor que 65%, porque como a cobertura seria parcial, existiria uma dificuldade muito grande para o equilíbrio das concentrações do metano entre o meio líquido e o meio gasoso. O meio gasoso ficaria saturado devido aos fluxos totais, com isso passaria a ocorrer, por difusão, a absorção do metano pelo meio líquido. No meio líquido, sob a cobertura, haveria um aumento da concentração do metano dissolvido, consequentemente, no meio líquido, sob a atmosfera, a concentração do metano seria menor, existindo na interface líquido-líquido a transferência de massa por difusão e por

convecção devido às correntes aquáticas, resultando na perda de parte do metano armazenado (Figura 5.13).

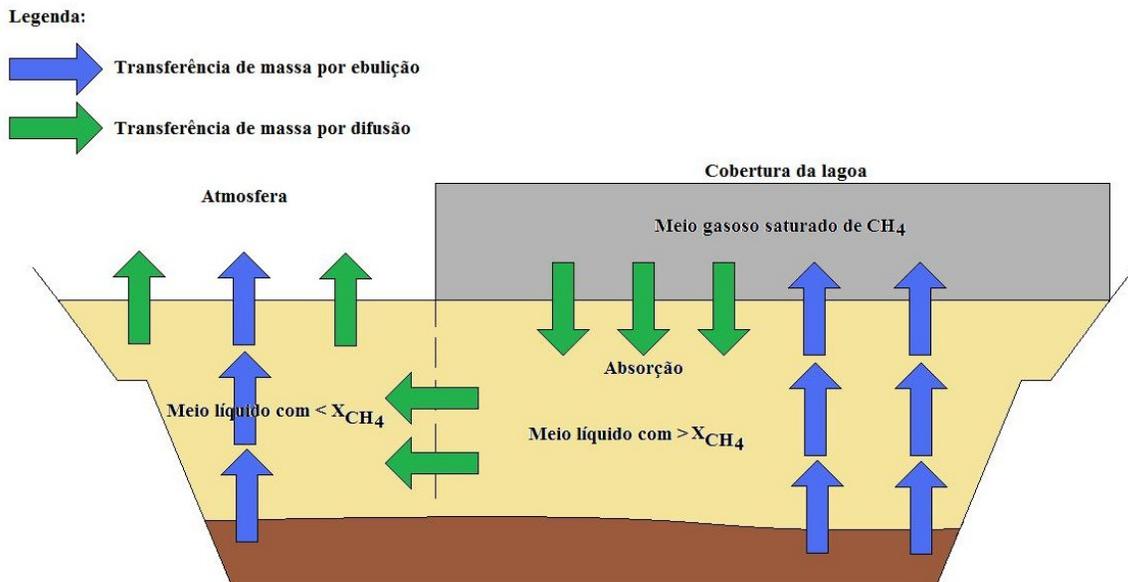


FIGURA 5.13: Ocorrência dos fluxos de metano após a instalação da cobertura para recuperação do metano.

Para o cálculo da estimativa do potencial de produção de energia a partir do metano emitido nas lagoas de decantação da ETEJ foi desprezada a perda do metano, conforme citada anteriormente, ou seja, foi considerada a recuperação de 65% do total emitido (471 kg CH₄/d).

Da Tabela 3.2 se tem o poder calorífico do metano (PCI = 11.946 kcal/kg CH₄ ou 50 MJ/kg CH₄ ou 13,89 kWh/kg CH₄).

Cálculo da energia produzida:

$$E = m_{CH_4} Rec. PCI_{CH_4} \quad (5.2)$$

Sendo,

E: energia produzida (kWh)

$m_{CH_4} Rec.$: massa recuperada de metano (kg)

PCI_{CH_4} : poder calorífico inferior (kWh/kg CH₄)

Substituindo os valores na Equação 5.2 estima-se o potencial de geração de energia em até 196 MWh/mês. O que representa um máximo de 10% da energia necessária, por mês, para movimentar a ETEJ. Porém não foi considerada nenhuma perda no processo de geração de energia, nem mesmo o rendimento do gerador. Assim na verdade, a geração seria menor. No presente estudo, este valor calculado representa aproximadamente 0,21 kWh/kg DBO removida, um valor considerado adequado em comparação ao obtido no estudo de Wagner et al. (2009) de aproximadamente 1kWh/kg DBO removida, onde se trabalhou com resíduos de suinocultura.

6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, pôde-se chegar as seguintes conclusões:

A partir das medidas de fluxos realizadas em duas lagoas de decantação da ETEJ, estas foram extrapoladas para a realização da estimativa do total de quatro lagoas existentes. Do fluxo médio calculado ($9.429 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2\text{d}$) e para a área das quatro lagoas de decantação (76.804 m^2), nas duas campanhas de amostragem, obteve-se uma emissão anual média de 264 Mg CH_4 (Megagramas ou toneladas de metano).

Quanto às divergências significativas observadas nas medições dos fluxos emitidos, pode-se destacar as grandes variações encontradas nas medidas dos fluxos totais utilizando-se a câmara estática. A configuração desta câmara causou um forte fator perturbativo das condições naturais de emissão de metano: a área superficial ficava confinada deixando de sofrer a ação dos ventos e recebendo um aquecimento diferenciado. A câmara estática, principalmente quando utilizada para a medição dos fluxos mais intensos, com maiores variações, recebe uma maior interferência dos fatores perturbativos causados no ponto de amostragem.

A separação dos fluxos considerando a forma de transporte do metano do lodo para a atmosfera (bolhas e difusão) permitiram melhor avaliação da emissão de metano nas lagoas de decantação da ETEJ. O fluxo ebulitivo foi significativamente mais intenso, respondendo por cerca de 95% da emissão total (ebulitivo $9.008 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2\text{d}$ e difusivo $421 \text{ mg CH}_4/\text{m}^2\text{d}$).

A altura do manto de lodo teve influência importante na emissão de metano, principalmente na campanha de amostragem realizada no ano de 2008, na lagoa de decantação n.º03.

A influência da temperatura, tanto nos fluxos difusivos, quanto nos fluxos ebulitivos, não ocorreu devido a pequena variação da mesma, ao longo das campanhas realizadas.

A comparação com a emissão obtida em outras fontes de metano, como por exemplo hidrelétricas, campos de cultivo de arroz e pantanais, indicam que a emissão de metano pelas lagoas de decantação da ETEJ são bem menores, apesar dos seus fluxos mais intensos. Porém uma comparação mais direta foi feita em relação a ETE de Durham (EUA – lodos ativados), onde a emissão de metano pelas lagoas de decantação da ETEJ (21,87 kg CH₄/t_{DBO}) ficou acima das emissões encontradas na ETE de Durham (1,60 kg CH₄/t_{DBO}). Apesar deste maior índice de emissão, em 2007 (segundo dados do IPCC) os EUA emitia aproximadamente 8 Tg CH₄/ano, o que permitiria a construção de uma ETE nas mesmas características da ETEJ, tratando a mesma carga atual para cada município brasileiro, o que mesmo assim, iria propiciar uma emissão brasileira abaixo da emissão norte-americana.

Devido a característica do sistema utilizado na ETE Jundiaí (lagoas de estabilização) não seria possível a recuperação de todo o metano emitido, mas da quantidade máxima que poderia ser recuperada (471 kg CH₄/d) seria possível a geração de aproximadamente 196MWh de energia. Este montante representa aproximadamente 10% da energia média consumida, por mês, durante o período da realização deste trabalho.

A proposta para a diminuição do metano emitido para a atmosfera é a que vem sendo aplicada desde o ano de 2000, com a redução do manto de lodo no interior das lagoas de decantação, porém a partir de 2008 o processo foi aprimorado, quando novas condições de dragagem foram implantadas, acelerando a diminuição dos picos de elevação do manto,

em regiões localizadas e melhorando a distribuição do lodo nas lagoas, buscando-se sempre a diminuição do manto de uma maneira geral.

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Para a elaboração de uma estimativa de emissão de metano mais representativa das lagoas de decantação da ETEJ, estender as medidas às demais lagoas, não amostradas, aumentando-se o número de pontos de amostragem, por lagoa;
- Estimar a emissão de metano em outros pontos da ETEJ, como gradeamento, poço da elevatória, desarenadores, canais de distribuição e lagoas de aeração, para verificação da importância (ou contribuição) na emissão total da ETEJ;
- Devido à limitação nos estudos de emissão de metano em Estações de Tratamento de Esgotos estimar a emissão de metano em outros sistemas de tratamento, como lodos ativados, UASB, lagoas anaeróbias, lagoas facultativas, entre outros.

ANEXOS

ANEXO A – Variáveis ambientais e tempos das amostragens

Nas tabelas a seguir são apresentadas as variáveis ambientais medidas durante as campanhas, incluindo-se os períodos de tempo de cada coleta, necessárias para o cálculo do fluxo de metano e também para estudo de como as emissões de metano podem ser influenciadas por elas.

TABELA A.1: Variáveis ambientais medidas em 11/02/2010.

Grandeza	Valor medido	Equipamento utilizado na medida / Informação sobre o dado obtido	Observações
Temperatura Líquido (°C)	26,0	termômetro analógico	medida pontual
Temperatura Ar - t_{ar} (°C)	23,0	termômetro analógico	medida pontual
Temperatura Câmara (°C)	26,0	termômetro analógico	medida pontual
Pressão Atmosférica - P_{atm} (kPa)	94,5	estação meteorológica "Weather Hawk"	média do dia
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	0,24	Sonda OD LDO (50cm de profundidade)	medida pontual
Velocidade dos Ventos (m/s)	2,0	estação meteorológica "Weather Hawk"	média do dia
Densidade metano (g/L)	0,616	calculada a partir de t_{ar} e P_{atm}	-

TABELA A.2: Volume de biogás coletado e tempos das coletas, utilizados nos cálculos dos fluxos e o número do relatório de análise das amostras na ACQUALAB.

Data coleta	Identificação da coleta	Observação das coletas	Hora da coleta	Volume de biogás medido (mL)	Tempo de coleta do volume biogás (minutos)	Relatório de ensaio
11/02/10	A1	coleta inicial	10:35	-	-	17.470/2010-1.0
11/02/10	A2	coleta final	13:42	-	-	17.471/2010-1.0
11/02/10	A3	coleta única	13:57	124	15	17.472/2010-1.0
11/02/10	A4	coleta inicial	14:25	-	-	17.473/2010-1.0
11/02/10	A5	coleta final	17:45	-	-	17.474/2010-1.0
11/02/10	A6	coleta única	18:00	90	15	17.475/2010-1.0

TABELA A.3: Variáveis ambientais medidas em 25/02/2010.

Grandeza	Valor medido	Equipamento utilizado na medida / Informação sobre o dado obtido	Observações
Temperatura Líquido (°C)	27,0	termômetro analógico	medida pontual
Temperatura Ar - t_{ar} (°C)	23,0	termômetro analógico	medida pontual
Temperatura Câmara (°C)	24,0	termômetro analógico	medida pontual
Pressão Atmosférica - P_{atm} (kPa)	94,5	estação meteorológica "Weather Hawk"	média do dia
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	0,15	Sonda OD LDO (50cm de profundidade)	medida pontual
Velocidade dos Ventos (m/s)	3,6	estação meteorológica "Weather Hawk"	média do dia
Densidade metano (g/L)	0,616	calculada a partir de t_{ar} e P_{atm}	-

TABELA A.4: Volume de biogás coletado e tempos das coletas, utilizados nos cálculos dos fluxos e o número do relatório de análise das amostras na ACQUALAB.

Data coleta	Identificação da coleta	Observação das coletas	Hora da coleta	Volume de biogás medido (mL)	Tempo de coleta do volume biogás (minutos)	Relatório de ensaio
25/02/10	A1	coleta inicial	10:10	-	-	17.470/2010-1.0
25/02/10	A2	coleta final	13:50	-	-	17.471/2010-1.0
25/02/10	A3	coleta única	10:00	82	15	17.472/2010-1.0
25/02/10	A4	coleta inicial	14:15	-	-	17.473/2010-1.0
25/02/10	A5	coleta final	17:20	-	-	17.474/2010-1.0
25/02/10	A6	coleta única	14:00	54	15	17.475/2010-1.0

TABELA A.5: Variáveis ambientais medidas em 11/03/2010.

Grandeza	Valor medido	Equipamento utilizado na medida / Informação sobre o dado obtido	Observações
Temperatura Líquido (°C)	26,0	termômetro analógico	medida pontual
Temperatura Ar - t_{ar} (°C)	27,0	termômetro analógico	medida pontual
Temperatura Câmara (°C)	29,0	termômetro analógico	medida pontual
Pressão Atmosférica - P_{atm} (kPa)	94,0	estação meteorológica "Weather Hawk"	média do dia
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	0,18	Sonda OD LDO (50cm de profundidade)	medida pontual
Velocidade dos Ventos (m/s)	1,7	estação meteorológica "Weather Hawk"	média do dia
Densidade metano (g/L)	0,605	calculada a partir de t_{ar} e P_{atm}	-

TABELA A.6: Volume de biogás coletado e tempos das coletas, utilizados nos cálculos dos fluxos e o número do relatório de análise das amostras na ACQUALAB.

Data coleta	Identificação da coleta	Observação das coletas	Hora da coleta	Volume de biogás medido (mL)	Tempo de coleta do volume biogás (minutos)	Relatório de ensaio
11/03/10	A1	coleta inicial	08:32	-	-	17.470/2010-1.0
11/03/10	A2	coleta final	11:55	-	-	17.471/2010-1.0
11/03/10	A3	coleta única	08:40	-	-	17.472/2010-1.0
11/03/10	A4	coleta inicial	12:12	-	-	17.473/2010-1.0
11/03/10	A5	coleta final	15:22	-	-	17.474/2010-1.0
11/03/10	A6	coleta única	12:20	-	-	17.475/2010-1.0

TABELA A.7: Variáveis ambientais medidas em 08/04/2010.

Grandeza	Valor medido	Equipamento utilizado na medida / Informação sobre o dado obtido	Observações
Temperatura Líquido (°C)	22,0	termômetro analógico	medida pontual
Temperatura Ar - t_{ar} (°C)	18,0	termômetro analógico	medida pontual
Temperatura Câmara (°C)	19,0	termômetro analógico	medida pontual
Pressão Atmosférica - P_{atm} (kPa)	94,9	estação meteorológica "Weather Hawk"	média do dia
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	0,14	Sonda OD LDO (50cm de profundidade)	medida pontual
Velocidade dos Ventos (m/s)	2,3	estação meteorológica "Weather Hawk"	média do dia
Densidade metano (g/L)	0,629	calculada a partir de t_{ar} e P_{atm}	-

TABELA A.8: Volume de biogás coletado e tempos das coletas, utilizados nos cálculos dos fluxos e o número do relatório de análise das amostras na ACQUALAB.

Data coleta	Identificação da coleta	Observação das coletas	Hora da coleta	Volume de biogás medido (mL)	Tempo de coleta do volume biogás (minutos)	Relatório de ensaio
08/04/10	A1	coleta única	15:40	-	-	17.470/2010-1.0
08/04/10	A2	coleta inicial	15:50	-	-	17.471/2010-1.0
08/04/10	A3	coleta 2	16:05	-	-	17.472/2010-1.0
08/04/10	A4	coleta 3	16:20	-	-	17.473/2010-1.0
08/04/10	A5	coleta final	16:35	-	-	17.474/2010-1.0
08/04/10	A6	coleta única	15:45	90	10	17.475/2010-1.0

TABELA A.9: Variáveis ambientais medidas em 22/04/2010.

Grandeza	Valor medido	Equipamento utilizado na medida / Informação sobre o dado obtido	Observações
Temperatura Líquido (°C)	25,0	termômetro analógico	medida pontual
Temperatura Ar - t_{ar} (°C)	29,0	termômetro analógico	medida pontual
Temperatura Câmara (°C)	31,0	termômetro analógico	medida pontual
Pressão Atmosférica - P_{atm} (kPa)	94,4	estação meteorológica "Weather Hawk"	média do dia
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	0,20	Sonda OD LDO (50cm de profundidade)	medida pontual
Velocidade dos Ventos (m/s)	1,3	estação meteorológica "Weather Hawk"	média do dia
Densidade metano (g/L)	0,603	calculada a partir de t_{ar} e P_{atm}	-

TABELA A.10: Volume de biogás coletado e tempos das coletas, utilizados nos cálculos dos fluxos e o número do relatório de análise das amostras na ACQUALAB.

Data coleta	Identificação da coleta	Observação das coletas	Hora da coleta	Volume de biogás medido (mL)	Tempo de coleta do volume biogás (minutos)	Relatório de ensaio
22/04/10	A1	coleta única	09:30	-	-	17.470/2010-1.0
22/04/10	A2	coleta inicial	09:35	-	-	17.471/2010-1.0
22/04/10	A3	coleta 2	09:50	-	-	17.472/2010-1.0
22/04/10	A4	coleta 3	10:05	-	-	17.473/2010-1.0
22/04/10	A5	coleta final	10:20	-	-	17.474/2010-1.0
22/04/10	A6	coleta única	09:20	50	5	17.475/2010-1.0

TABELA A.11: Variáveis ambientais medidas em 06/05/2010.

Grandeza	Valor medido	Equipamento utilizado na medida / Informação sobre o dado obtido	Observações
Temperatura Líquido (°C)	26,0	termômetro analógico	medida pontual
Temperatura Ar - t_{ar} (°C)	27,0	termômetro analógico	medida pontual
Temperatura Câmara (°C)	29,0	termômetro analógico	medida pontual
Pressão Atmosférica - P_{atm} (kPa)	94,7	estação meteorológica "Weather Hawk"	média do dia
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	0,20	Sonda OD LDO (50cm de profundidade)	medida pontual
Velocidade dos Ventos (m/s)	1,6	estação meteorológica "Weather Hawk"	média do dia
Densidade metano (g/L)	0,609	calculada a partir de t_{ar} e P_{atm}	-

TABELA A.12: Volume de biogás coletado e tempos das coletas, utilizados nos cálculos dos fluxos e o número do relatório de análise das amostras na ACQUALAB.

Data coleta	Identificação da coleta	Observação das coletas	Hora da coleta	Volume de biogás medido (mL)	Tempo de coleta do volume biogás (minutos)	Relatório de ensaio
06/05/10	A1	coleta inicial	08:35	-	-	21.128/2010-1.0
06/05/10	A2	coleta final	09:05	-	-	21.129/2010-1.0
06/05/10	A3	coleta única	09:15	82	15	21.132/2010-1.0
06/05/10	A4	coleta inicial	09:30	-	-	21.133/2010-1.0
06/05/10	A5	coleta final	10:00	-	-	21.134/2010-1.0
06/05/10	A6	coleta única	10:20	54	15	21.135/2010-1.0

TABELA A.13: Variáveis ambientais medidas em 13/05/2010.

Grandeza	Valor medido	Equipamento utilizado na medida / Informação sobre o dado obtido	Observações
Temperatura Líquido (°C)	27,0	termômetro analógico	medida pontual
Temperatura Ar - t_{ar} (°C)	28,0	termômetro analógico	medida pontual
Pressão Atmosférica - P_{atm} (kPa)	94,9	estação meteorológica "Weather Hawk"	média do dia
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	0,34	Sonda OD LDO (10cm de profundidade)	média 6 pontos
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	0,12	Sonda OD LDO (50cm de profundidade)	média 6 pontos
Velocidade dos Ventos (m/s)	1,1	estação meteorológica "Weather Hawk"	média do dia
Densidade metano (g/L)	0,608	calculada a partir de t_{ar} e P_{atm}	-

TABELA A.14: Volume de biogás coletado e tempos das coletas, utilizados nos cálculos dos fluxos e o número do relatório de análise das amostras na ACQUALAB.

Data Coleta	Identificação da coleta	Observação das coletas	Densidade calculada (g/L)	Volume de biogás medido (mL)	Tempo de coleta do volume biogás (minutos)	Relatório de ensaio
13/05/10	A1	coleta única	0,608	150	15	21.136/2010-1.0
13/05/10	A2	coleta única	0,608	145	15	21.137/2010-1.0
13/05/10	A3	coleta única	0,608	125	15	21.138/2010-1.0
13/05/10	A4	coleta única	0,608	145	15	21.139/2010-1.0
13/05/10	A5	coleta única	0,608	150	15	21.140/2010-1.0
13/05/10	A6	coleta única	0,608	120	15	21.141/2010-1.0

TABELA A.15: Variáveis ambientais medidas durante a primeira campanha de amostragem.

Data Coleta	Temperatura Líquido (°C)	Temperatura Ar (°C)	Pressão Atmosférica (kPa)
28/02/08	24,0	29,0	94,9
02/04/08	25,0	20,0	94,5
03/04/08	25,0	23,0	94,3
14/05/08	21,0	25,0	94,5
15/05/08	21,0	26,0	94,4
18/06/08	20,0	22,0	94,6
19/06/08	21,0	24,0	94,7
03/07/08	20,0	20,0	94,7
20/08/08	23,0	25,0	94,2
21/08/08	23,0	26,0	94,4

TABELA A.16: Densidade calculada para as condições de pressão e temperaturas durante a amostragem, volume de biogás coletado e tempos das coletas, utilizados nos cálculos dos fluxos e o número do relatório de análise das amostras na TASQA.

Data coleta	Identificação da coleta	Observação das coletas	Densidade calculada (g/L)	Volume de biogás medido (mL)	Tempo de coleta do volume biogás (minutos)	Relatório de ensaio
28/02/08	C2	coleta única	0,606	170	14	5383/2008-1.0
02/04/08	C2	coleta única	0,622	170	10	9029/2008-1.1
03/04/08	C1	coleta única	0,615	170	30	9030/2008-1.1
14/05/08	C1	coleta única	0,612	170	26	13978/2008-1.0
15/05/08	C2	coleta única	0,609	170	16	13977/2008-1.0
18/06/08	C2	coleta única	0,619	170	8	33760/2008-1.0
19/06/08	C1	coleta única	0,615	170	34	33759/2008-1.0
03/07/08	C2	coleta única	0,624	170	10	35420/2008-1.0
20/08/08	C1	coleta única	0,610	170	40	39326/2008-1.0
21/08/08	C2	coleta única	0,609	170	12	39327/2008-1.0

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENDA 21 BRASILEIRA. Comissão de Políticas de Desenvolvimento Sustentável e da Agenda 21 Nacional – no âmbito da Câmara de Política dos Recursos Naturais, criada pelo decreto do Presidente da República em fevereiro de 1997.

AGOSTINETTO, D., FLECK, N.G., RIZZARDI, M.A., JÚNIOR, A.A.B. Potencial de Emissão de Metano em Lavouras de Arroz Irrigado, *Ciência Rural*, Santa Maria, v.32, n.6, p. 1073-1081, 2002.

ALVES, F., *Revista Saneamento Ambiental*. São Paulo – Bimestral – Número 146 – Janeiro/Fevereiro, 2010 – Mudanças Climáticas. ISSN 0103-7056.

BAIRD, C. *Química Ambiental*. Tradução: Maria Angeles Lobo Recio e Luiz Carlos Marques Carrera, 2ªed., Porto Alegre: Bookman, 2002.

BLAKE, D.R., ROWLAND, F.S. Continuing Worldwide Increase in Tropospheric Methane, 1978 to 1987. *Science*, v.239, n.4844, p. 1129-1131, Mar. 1988.

CHANG, T.C., YANG, S.S. Methane Emission from Wetlands in Taiwan, *Atmospheric Environment*, v.37, p. 4551-4558, July 2003.

- CHERNICHARO, C.A.L. Reatores Anaeróbios, Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias v.05, Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, p.163, 1997.
- CIOLA, R. Fundamentos da Cromatografia a Gás. São Paulo, Edgard Blücher, 266p, 1985.
- COOKE, D. Energy & Environmental Visions for the New Millennium – Capítulo 63: The Greenhouse Challenge Program, Published by The Fairmont Press, Inc., USA, 1998.
- CREMASCO, M.A. Fundamentos de Transferência de Massa, 2ªed., Campinas, SP, Editora da Unicamp, 2002.
- CRUTZEN, P., Overview of tropospheric chemistry: developments during the past quarter century and a look ahead. Faraday Discuss. 100, 1 – 21, 1995.
- CZEPIEL, P.M., CRILL, P.M., HARRISS, R.C., Methane Emissions from Municipal Wastewater Treatment Process. Environ. Sci. Technol., 27, 2472 – 2477, 1993.
- DING, W., CAI, Z., WANG, D. Preliminary Budget of Methane Emissions from Natural Wetlands in China. Atmospheric Environment, v. 38, p. 751-759, 2003.
- DUAN, X., WANG, X., MU, Y., OUYANG, Z. Seasonal and Diurnal Variations in Methane Emissions from Wuliangsu Lake in Arid Regions of China. Atmospheric Environment, v. 39, p. 4479-4487, 2005.
- DUEÑAS, C., FERNÁNDEZ, M.C., CARRETERO, J., LIGER, E. Methane Uptake in Soils of Southern Spain Estimated by Two Different Techniques: Static Chamber and 222Randon Flux and Soil Air Concentration Profiles. Atmospheric Environment, v. 30, n.º04, p. 545-552, 1996.

- FADINI, P.S., Comportamento Biogeoquímico do Mercúrio na Bacia do Rio Negro (AM), Tese de Doutorado, Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 1999.
- FEARNSIDE, P.M., Emissões de Gases de Efeito Estufa por Represas Hidrelétricas: Controvérsias Fornecem um Trampolim para Repensar uma Fonte de Energia Supostamente “Limpa”. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA – Manaus, Amazonas, 2004.
- FEARNSIDE, P.M., Hidrelétricas como “Fábricas de Metano”: O Papel dos Reservatórios em Áreas de Floresta Tropical na Emissão de Gases de Efeito Estufa. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA – Manaus, Amazonas, *Oecol. Bras.*, 12 (1): 100-115, 2008.
- GETTELMAN, A., HOLTON, J.R., ROSENLOF, K.H., Mass fluxes of O₃, CH₄, N₂O e CF₂CL₂ in the lower atmosphere calculated from observational data. *J. Geophys. Res.* 102, 19149 - 19159, 1997.
- HARGREAVES, K.J., FOWLER, D. Quantifying the Effects of Water Table and Soil Temperature on the Emission of Methane from Peat Wetland at the Field Scale. *Atmospheric Environment*, v.32, n.º19, p.3275-3282, 1998.
- HELLMUND, P.C., SMITH, D.S. Designing Greenways – Sustainable Landscapes for Nature and People. Islandpress, Washington, chapter 6 – Ecological Greenway Design, p.207-209, 2006.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996 – Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007 – Climate Change 2007 – WG-I: The Physical Science Basis.

- KHALIL, M.A.K., RASMUSSEN, R.A. Global Emissions of Methane During the Last Several Centuries. *Chemosphere*, v.29, n.5, p. 833-842, Sept. 1994.
- LAY, J.J., MIYAHARA, T., NOIKE, T. Methane Release Rate and Methanogenic Bacterial Populations in Lake Sediments. *Water Research*, v.30, n.4, p. 901-908, 1996.
- LETTINGA, G., HAANDEL, A.C. VAN. Tratamento Anaeróbio de Esgotos – Um manual para regiões de clima quente, Capítulo 01 – Esgoto e o seu Tratamento. p.I-1 e p.I-2, 1994.
- LEVINE, J.S., COFER, W.R., PINTO, J.P. Biomass Burning. In: Khalil, M. (Ed.) Atmospheric Methane: Its role in the global environment. New York, NY: Springer-Verlag, p. 190-201, 2000.
- LIVESLEY, S.J., ECKARD, R., ARNDT, S.K. Nitrous Oxide and Methane Flux in Australian and New Zeland Landscapes: Measurements, Modeling and Mitigation. *Plant Soil, Editorial*, v.309, p. 1-4, 2008.
- MARANI, L. Estudo da emissão de metano no Pantanal Sul-Matogrossense. Tese de Doutorado do Curso de Pós-graduação em Geofísica Espacial. p. 23-25, 2007.
- McGEER, P., DURBIN, E., Methane: Fuel for the Future, Congress at Delta's River Inn, Vancouver, Sept. 1981.
- NETTO, J.M.A. Sistemas de Esgotos Sanitários. Lodos, Características e Volumes – Digestão, Digestores – Gás. Faculdade de Saúde Pública – USP, p. 360, 1973.
- NOUR, E.A.A., Tratamento de Esgoto Sanitário Empregando-se Reator Anaeróbio Compartimentado, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 1996.

- PEER, R.L., THORNEOLE, S.A., EPPERSON, D.L. A Comparison of Methods for Estimating Global Methane Emission from Landfills. *Chemosphere*, v.26, n.1-4, p. 387-400, Jan.-Feb. 1993.
- PERRY, J.H., *Chemical Engineers' Handbook*, fourth edition, international student edition, ed. McGraw-Hill Book Company Inc., 1963.
- PIETROBON, C.L.R., ANDRADE, C.M.G., BERGAMASCO, R., PIETROBON, C.E., *Modelo Simplificado para Lixiviação de Contaminantes de Compostos de Lodo-cimento*, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá – Paraná, v.26, n.2, p. 103-107, 2004.
- RAMOS, F.M., BAMBACE, L.A.W., LIMA, I.B.T., ROSA, R.R., MAZZI, E.A., FEARNside, P.M., *Methane Stocks in Tropical Hydropower Reservoirs as a Potential Energy Source: An editorial essay*. *Climatic Change* (in press), 2008. ISSN 0165-0009.
- ROSA, L.P., *Emissões de dióxido de carbono e de metano pelos reservatórios hidrelétricos brasileiros: relatório final / Centrais Elétricas Brasileiras S.A., DEA, DEAA; (inventário das emissões de gases de efeito estufa derivadas de hidrelétricas)*; Rio de Janeiro: Eletrobrás 2000.
- RUTKOUSKI, E.W. *Desenhando a Bacia Ambiental – subsídios para o planejamento das águas doces metropolizadas*. Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade de São Paulo, 166p, Verão de 1999.
- SALOMON, K.R., LORA, E.E.S. *Estimativa do Potencial de Geração de Energia Elétrica para Diferentes Fontes de Biogás no Brasil*. *Biomassa e Energia*, v.2, n.1, p. 57-67, 2005.
- SANTOS, R.F. *Planejamento Ambiental: Teoria e Prática*. São Paulo, Oficina de Textos, p. 18-21, 2004.

- SILVA, F.M., JÚNIOR, J.L., BENICASA, M., OLIVEIRA, E., Desempenho de um Aquecedor de Água a Biogás. Engenharia Agrícola, v.25, n.3, Jaboticabal, SP, 2005.
- SILVA, L.A.S., Otimização e Aplicação de Câmaras para Medição de Fluxos de Mercúrio Gasoso Dissolvido na Interface Água/Atmosfera em Lagos da Bacia do Rio Negro – AM. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, SP. 2006.
- SOUBES, M. Microbiologia de la digestion anaeróbia. In: Anais III Taller y Seminario Latinoamericano: tratamiento anaerobio de aguas residuales. Montevideo, Uruguay, p. 15-28, 1994.
- VIEIRA, S.M.M., SILVA, J.W. Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatórios de Referência. Emissões de Metano no Tratamento e na Disposição de Resíduos. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB, p.13, 2006.
- VON SPERLING, M. Lagoas de Estabilização 2ed., Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias v.03, Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, p.89, 1986.
- VON SPERLING, M. Lodos Ativados 2ed., Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias v.04, Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, p.163-164; 172-173; 176-178, 2002.
- WAGNER, R.C., REGAN, J.M., OH, S.E., ZUO, Y., LOGAN, B.E. Hydrogen and Methane Production from Swine Wastewater Using Microbial Electrolysis Cells. Water Research, v.43, p.1480-1488, 2009.

WOLLENBERG, J.L., PETERS, S.C. Mercury Emission from a Temperate Lake during Autumn Turnover. *Science Direct: Science of the Total Environment*, n.407, p. 2909-2918, 2009.

WUEBBLES, D.J., HAYHOE, K. Atmospheric Methane and Global Change. *Earth Science Reviews*, v.57, n.3-4, p.177-210, May 2002.

ZHU, R., LIU, Y., SUN, L., XU, H. Methane Emissions from Two Tundra Wetlands in Eastern Antarctica. *Atmospheric Environment*, v.41, p.4711-4722, Mar 2007.

APÊNDICES

Apêndice A – Memória de cálculo dos fluxos (ebulitivos) de metano nas amostras do coletor de biogás

Volume de biogás medido na proveta:	170 mL
Tempo total para medição do volume:	14,0 min
Área do coletor de biogás:	0,515 m ²
Densidade do metano nas CNTP:	0,714 g/L (22,4 L para 1 mol)
Concentração do metano na amostra de biogás:	735.100,00 ppm(v)
Temperatura do ar:	29,0 °C
Pressão atmosférica:	0,936 atm

Cálculo da densidade para as condições ambientais da coleta:

Aplicando-se a equação dos gases ideais ($PV = nRT$), pode-se calcular o volume nas condições da coleta:

Volume calculado: 26,46 L

Com a massa de 1 mol de metano igual a 16,04 g, temos:

$$d_{CH_4} = \frac{16,04}{26,46} = 0,606 \text{ g/L}$$

Com isto se pode calcular o fluxo de metano no coletor de biogás, a partir da fórmula (5.1):

$$\Phi_{CH_4} = X_{CH_4} \times d_{CH_4} \times \frac{Q_{CH_4}}{A}$$

$$\Phi_{CH_4} = \frac{735.100,00}{1.000.000} \times 0,606 \times \frac{0,170/0,00972}{0,515}$$

$$\Phi_{CH_4} = 15,13 \frac{g_{CH_4}}{m^2.dia} \quad \text{OU}$$

$$\Phi_{CH_4} = 15.128,45 \frac{mg_{CH_4}}{m^2.dia}$$

Apêndice B – Memória de cálculo dos fluxos (ebulitivos e/ou difusivos) de metano nas amostras da câmara estática por variação da concentração (final – inicial)

Volume de útil da câmara:	17,83 L
Tempo total de amostragem:	45,0 min
Área da câmara:	0,080 m ²
Massa molar do metano:	16,04 g/mol
Concentração inicial do metano na amostra:	884,96 ppm(v)
Concentração final do metano na amostra:	2.299,83 ppm(v)
Temperatura do ar no interior da câmara:	19,0 °C
Pressão atmosférica:	0,932 atm

Cálculo do fluxo de metano na câmara estática, a partir da fórmula (4.3), adaptada para fluxo não constante, ou seja, presença de fluxo ebulitivo:

$$\Phi_{CH_4} = \frac{P.V.M_{CH_4}}{A.R.T} \times \frac{X_{fCH_4} - X_{iCH_4}}{\Delta t}$$

$$\Phi_{CH_4} = \frac{0,932 \times 17,83 \times 16,04}{0,080 \times 0,082 \times 292} \times \frac{(2.299,83 - 884,96) \times 10^{-6}}{0,03125}$$

$$\Phi_{CH_4} = 6,30 \frac{g_{CH_4}}{m^2 \cdot dia} \quad \text{OU}$$

$$\Phi_{CH_4} = 6.300,16 \frac{mg_{CH_4}}{m^2 \cdot dia}$$