

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**PÓS-TRATAMENTO DE ESGOTO: SISTEMA SEQUENCIAL DE  
LEITOS CULTIVADOS (*CONSTRUCTED WETLANDS*)  
VERTICAL E HORIZONTAL**

**REGINA MARIA FERREIRA DOS SANTOS**  
**Eng<sup>a</sup> Civil**

CAMPINAS  
ABRIL DE 2009

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**PÓS-TRATAMENTO DE ESGOTO: SISTEMA SEQUENCIAL DE  
LEITOS CULTIVADOS (*CONSTRUCTED WETLANDS*) VERTICAL  
E HORIZONTAL**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, na área de concentração Água e Solo – Desenvolvimento Tecnológico e Impacto sobre os Recursos Naturais.

**REGINA MARIA FERREIRA DOS SANTOS**

**Orientador: Prof. Dr. DENIS MIGUEL ROSTON**

**Co-Orientador: Dr. MARCELUS ALEXANDER ACORINTE VALENTIM**

CAMPINAS  
ABRIL DE 2009

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

Sa59 Santos, Regina Maria Ferreira dos  
Pós-tratamento de esgoto: sistema sequencial de leitos cultivados (constructed wetlands) vertical e horizontal / Regina Maria Ferreira dos Santos. -- Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Denis Miguel Roston, Marcelus Alexander Acorinte Valentim.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Águas residuais. 2. Nitrificação. 3. Plantas aquáticas. 4. Água reutilização. 5. Águas residuais - Purificação - Tratamento biológico. I. Roston, Denis Miguel. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Post-treatment of sewage: sequential system of vertical and horizontal constructed wetlands

Palavras-chave em Inglês: Sewage, Nitrification, Aquatic plants, Water reuse, Sewage Purification Biological

Área de concentração: Água e Solo

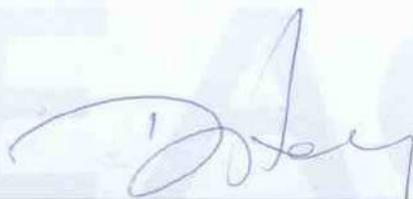
Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Luciano Zanella, José Euclides Stipp Paterniani

Data da defesa: 19/02/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Regina Maria Ferreira dos Santos**, aprovada pela Comissão Julgadora em 19 de fevereiro de 2009, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



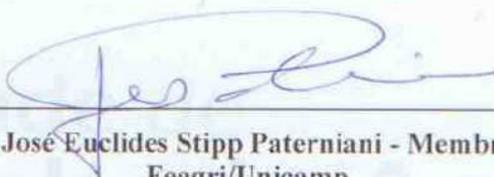
---

**Prof. Dr. Denis Miguel Roston – Presidente e Orientador  
Feagri/Unicamp**



---

**Dr. Luciano Zanella – Membro Titular  
IPT**



---

**Prof. Dr. José Euclides Stipp Paterniani - Membro Titular  
Feagri/Unicamp**

*Porque há esperança para a árvore,  
pois, mesmo cortada,  
ainda se renovará,  
e não cessarão os seus rebentos.  
Se envelhecer na terra a sua raiz,  
e no chão morrer o seu tronco,  
ao cheiro das águas brotará  
e dará ramos como a planta nova,  
ao cheiro das águas.  
(Jó 14:7)*

*Aos meus pais, pelo grande esforço dedicado  
à minha formação.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, ao meu Senhor Jesus Cristo, que ao longo desse percurso disponibilizou sua doce presença de forma muito especial, dando-me experiências singulares com a sua pessoa viva e, ainda, cuidando e abençoando esse trabalho;

À minha família, pela dedicação e compreensão, apesar da distância. Ao longo desses meses distantes pude entender a dimensão de sua importância para mim;

Ao Prof. Dr. Denis Miguel Roston pela orientação e apoio na realização deste trabalho. Esse é um professor que, além de uma vida intelectual exercitada, tem uma humanidade elevada.

Ao Prof. Dr. Marcelus Alexander Acorinte Valentim, pela co-orientação e contribuição na organização e co-relação dos dados;

Aos professores: Dr. Ricardo de Lima Isaac e Dr. Rubens Bresaola Junior pela recomendação junto à Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp quando do processo seletivo, acreditando no meu potencial para execução desse trabalho. E, ao professor Bresaola disponho uma atenção especial pelo acompanhamento e conselhos expressos ao longo desse percurso.

Ao Professor e amigo Dr. José Roberto Lopes pela consideração ao conduzir o professor Denis à Estância Árvore da Vida, apresentando e explanando sua história desde seu surgimento em 1980;

À Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp, e aos amigos e técnicos dos Laboratórios, de Saneamento e de Ensaio de Materiais;

Ao Giovani, do Laboratório de Saneamento da Feagri. A ele, especial agradecimento pelas grandes contribuições nas análises laboratoriais e preocupação com este trabalho. Também mostro minha gratidão à Flávia e Gisleiva, as quais prestaram suas contribuições quando das análises no Laboratório de Ensaio de Materiais;

Às estagiárias, Patrícia e Ana, que ao longo do estágio, disponibilizaram parte do seu tempo para ajudar nas análises laboratoriais. Não poderia me esquecer do Mateus e da Adriana, pela atenção à medida das suas possibilidades, mas que foi de grande utilidade para o trabalho;

À Estância Árvore da Vida, especialmente ao gerente da Empresa, Jonas Pizarro, pela disponibilização de espaço, mão de obra para implantação do sistema experimental e viabilidade

na compra dos materiais, bem como, a todos os funcionários que de alguma forma contribuíram para que o trabalho viesse à existência, especialmente aos amigos; Joel e Tevaldo (este conhecido amigavelmente por Vavá) que demonstraram preocupação e atenção constantes;

Ao Joel, demonstro reconhecimento pela sua presença, não só na implantação do sistema, mas também, durante toda a pesquisa, inclusive, na operação das aplicações afluentes efetuadas manualmente quando era necessário me ausentar para efetuar as avaliações laboratoriais na Unicamp e em muitos outros momentos;

Aos funcionários da Estância Árvore da Vida, Balbino, Amaro, Pedrinho, Wilson Lima, Anilson e Luis Nunes, que à medida do possível, contribuíram com o trabalho nas necessidades associadas às atividades que exerciam;

À Cíntia e toda sua família, especialmente sua mãe Eunice (a querida Bá, assim chamada carinhosamente pelos amigos) pelas hospedagens quando das idas e vindas para a Estância Árvore da Vida;

À Igreja em Campinas pelo cuidado e compreensão, especialmente ao Nelson Matos, pela preocupação, bem como, provisão de moradia ao longo da minha estadia em Campinas. Dispenso gratidão a alguns membros da igreja que estiveram muito próximos desse trabalho, quer academicamente, afetivamente, espiritualmente e até mesmo financeiramente. Dentre os quais:

Presto agradecimento especial ao casal de amigos Carla e Josias. Ela, além de companheira de jornada, foi grande incentivadora, principalmente nas questões acadêmicas, do princípio ao fim desse trabalho; ele, por sua vez, possibilitou, através de suas análises estatísticas, que eu e meu orientador visualizássemos com mais clareza a performance de tratabilidade do sistema, permitindo ampliar nossa percepção quanto a seu delineamento.

À Márcia Scaramuzza, companheira de orações e grandes incentivos, que me proporcionou, inclusive, moradia constante na Estância Árvore da Vida, o que deu bastante tranquilidade para o acompanhamento da etapa experimental e parte da escrita do trabalho. Demonstro também agradecimento especial à sua família; dona Antonia, e ao Esdras, este bastante presente quando eu necessitava de informações associadas à computação;

Às amigas, Sandra, Márcia Jacob e sua mãe dona Luzia, Luiza Onaga e dona Vera, pelo cuidado e carinho de mãe dispensada a mim nesses meses longe da minha família;

Às companheiras de república em Campinas (casa das irmãs), Dani, Val, Marti, Livia, Manu, Valqui, Karina e Talita pelo companheirismo e grande ajuda, especialmente através das orações todas as noites de segunda feira;

Ao Ioanis e Claire, Beto e Graça, Fabíola, Mirna, Carmem, demonstro minha gratidão pela amizade e preocupação muitas vezes demonstradas em relação ao andamento desse trabalho;

À amiga Leda e sua família, Sandro e Mariana, moradores da Estância Árvore da Vida, que muito me ouviram nos momentos de desabafo e carência familiar;

Não poderia me esquecer dos amigos José Carlos e Ioní, Paulinha, Castorina e Adriana Onaga, pelas caronas providenciais que tornaram mais fáceis as idas e vindas para a Unicamp e de Sumaré para a Estância Árvore da Vida, num período muito difícil dessa jornada;

Às amigas, Arkana, Josânia e Cida pelo carinho, preocupação e atenção dispensados em várias etapas desse trabalho;

Por fim, meus agradecimentos especiais à CAPES pelo apoio através da concessão da bolsa de mestrado.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xv</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS</b> .....	<b>xvii</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xx</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xxii</b>
<b>1 – INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 – OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
2.1 – <i>Geral</i> .....	3
2.2 – <i>Específicos</i> .....	3
<b>3 - REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>4</b>
3.1 - <i>Escassez hídrica</i> .....	4
3.2 – <i>Reúso de água</i> .....	6
3.3 - <i>Tratamento de água residuária</i> .....	22
3.3.1 – <i>Leitos Cultivados com macrófitas</i> .....	24
3.3.1.1 - <i>Classificação e parâmetros de projeto</i> .....	24
3.3.1.2 - <i>Leitos cultivados com macrófita combinados – híbrido</i> .....	25
3.3.1.2.1 - <i>Leitos Cultivados com Macrófitas de Fluxo Vertical (LCFV)</i> .....	26
3.3.1.2.2 - <i>Leitos Cultivados com Macrófitas de Fluxo Horizontal (LCFH)</i> .....	27
3.3.1.3 - <i>Elementos Atuantes</i> .....	28
3.3.1.4 – <i>Pesquisas desenvolvidas em Leitos Cultivados com Macrófitas</i> .....	33
3.3.1.4.1 – <i>Pesquisas desenvolvidas em Leitos Cultivados de Fluxo Vertical (LCFV)</i> .....	38
3.3.2 – <i>Mecanismos de Depuração das Águas Residuárias nos Leitos Cultivados com Macrófitas</i> .....	39
3.3.3 – <i>Distúrbios ambientais provocados pelo Lançamento de esgotos contendo compostos nitrogenados</i> .....	40
3.3.4 – <i>Transformação da série Nitrogenada</i> .....	42
3.3.4.1 – <i>Amonificação</i> .....	44
3.3.4.2 – <i>Nitrificação</i> .....	44
3.3.4.3 – <i>Denitrificação</i> .....	45

3.3.5 – <i>Desinfecção</i> .....	47
3.3.6 – Fatores que influenciam na desinfecção .....	49
3.3.6.1 – Tempo de Contato .....	49
3.3.6.2 – Concentração e tipo do Agente Químico.....	51
3.3.6.3 – Número de Organismos .....	51
3.3.7 – <i>Processo de desinfecção</i> .....	52
3.3.7.1 - <i>Cloração</i> .....	53
3.3.7.1.1 – Reações do Cloro em Meio Aquoso .....	53
3.3.7.1.2 – Reações do Cloro com Esgoto.....	55
<b>4 – MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>58</b>
4.1 – <i>Descrição do Local do Experimento</i> .....	58
4.2 – <i>Estação de Tratamento de Esgoto existente na EAV</i> .....	59
4.2.1 - <i>Características do Esgoto da EAV</i> .....	61
4.3 - <i>Sistema Experimental - projeto</i> .....	62
4.4 - <i>Projeto e Construção do Sistema Experimental</i> .....	65
4.4.1 – <i>Etapa Preliminar</i> .....	65
4.4.2 – <i>Leitos Cultivados com Macrófitas</i> .....	67
4.4.2.1 – <i>Construção dos Leitos</i> .....	67
4.4.2.1.1 – <i>Montagem dos Leitos de Fluxo Vertical</i> .....	71
4.4.2.1.2 – <i>Montagem dos Leitos de Fluxo Horizontal</i> .....	77
4.4.3 – <i>Canal de Desinfecção - Cloração</i> .....	80
4.5 – <i>Cultivo dos Leitos</i> .....	83
4.5.1 – <i>Coleta e Plantio das Macrófitas</i> .....	83
4.6 – <i>Manutenção do Sistema Experimental</i> .....	88
4.7.1 – <i>Parâmetros de Qualidade</i> .....	89
4.7.2 – <i>Preparação, Coleta de amostras e Análise Laboratoriais</i> .....	89
<b>5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>91</b>
5.1 – <i>Macrófitas</i> .....	91

5.2 – <i>Desempenho dos leitos cultivados com macrófitas</i> .....	98
<b>6 – CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES</b> .....	<b>136</b>
<b>7 – CONCLUSÃO FINAL E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>142</b>
<b>8 – ANEXOS</b> .....	<b>144</b>
8.1 – <i>Repercussão do Projeto Simplificado junto à comunidade</i> .....	144
8.2 – <i>Memorial de Cálculo</i> .....	147
<b>9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>148</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Detalhes dos LCFVs: Tubulação de distribuição do Efluente, Tubulação de coleta do efluente.....	26
<b>Figura 2.</b> Esquema do LCFH (sem escala).....	28
<b>Figura 3.</b> Detalhes: a) Leito Cultivado, b) Rizosfera e transferência de Oxigenio para as raízes.....	29
<b>Figura 4.</b> Diferentes tipos de plantas adaptadas na água e em solo saturado.....	31
<b>Figura 5.</b> Área de eventos Estância Árvore da Vida.....	58
<b>Figura 6.</b> Fluxograma da ETE em funcionamento e a disposição final do efluente.....	60
<b>Figura 7.</b> Fluxograma do Sistema Experimental.....	62
<b>Figura 8.</b> Corte Longitudinal, Tanque de Aeração da ETE da EAV, Sistema Experimt....	63
<b>Figura 9.</b> Foto demonstrativa da primeira etapa do Sistema Experimental.....	65
<b>Figura 10.</b> Pré-filtro de brita 2: Montagem e instalação.....	65
<b>Figura 11.</b> Interligação da caixa de equalização com a caixa de passagem contentora de filtro/dreno, detalhes de tubulações e do filtro/dreno.....	66
<b>Figura 12.</b> Disposição dos leitos cultivados com macrófitas.....	68
<b>Figura 13.</b> Dispositivo para controle e suprimento, entrada e saída de efluente nos leitos	69
<b>Figura 14.</b> Tonel controlador das aplicações afluentes nos leitos, peneira para proteção em relação a sólidos.....	70
<b>Figura 15.</b> Disposição dos leitos e a montagem do maciço filtrante.....	71
<b>Figura 16.</b> Curva granulométrica da areia utilizada nos leitos cultivados com macrófitas	72
<b>Figura 17.</b> Foto representativa destacando a evolução da montagem dos leitos cultivados com macrófitas de fluxo vertical.....	74
<b>Figura 18.</b> Detalhe da evolução da montagem dos leitos cultivados com macrófitas de fluxo vertical.....	75
<b>Figura 19.</b> Tubulação de distribuição nos leitos de fluxo vertical suspensa por três linhas de fio.....	76
<b>Figura 20.</b> Fotos representativas do leito cultivado com macrófitas de fluxo horizontal implantado na ETE da Estância Árvore da Vida.....	78
<b>Figura 21.</b> Foto do canal de cloração.....	80

<b>Figura 22.</b> Detalhe para aplicação das dosagens do desinfetante.....	81
<b>Figura 23.</b> Foto ilustrativa dos módulos dos leitos já cultivados com as macrófitas em fase de evolução.....	83
<b>Figura 24.</b> Fotos representativas associadas ao primeiro plantio das macrófitas.....	86
<b>Figura 25.</b> Macrófita com matéria orgânica na raiz para o replantio direto no maciço filtrante.....	87
<b>Figura 26.</b> Mudanças plantadas em vasos preenchidos com a mesma areia dos leitos, como reserva para o replantio nos leitos verticais, replantio de mudas com brotos nos leitos verticais.....	87
<b>Figura 27.</b> Foto representativa das macrófitas no dia do primeiro plantio nos LCFVs e no LCFH (06/03/2008).....	92
<b>Figura 28.</b> Foto das macrófitas 09 semanas após o primeiro plantio no LCFH e em adaptação durante o replantio gradativo nos LCFVs (24/05/2008).....	93
<b>Figura 29.</b> Evolução das macrófitas já adaptadas e em fase de crescimento nos leitos: 12 semanas após o primeiro plantio no LCFH e já perfeitamente adaptadas nos LCFVs (16/06/2008).....	93
<b>Figura 30.</b> Evolução das macrófitas nos Leitos 17 semanas após o primeiro plantio no LCFH e em evolução nos LCFVs (23/07/2008).....	94
<b>Figura 31.</b> Foto representativa das macrófitas nos Leitos 21 semanas após o primeiro plantio no LCFH e em evolução nos LCFVs (23/08/2008).....	94
<b>Figura 32.</b> Foto evolutiva das macrófitas apresentando florescência nos Leitos Verticais e Horizontal (07/10/2008).....	95
<b>Figura 33.</b> Fotos demonstrativas das macrófitas demonstrando o vigor e o comprimento da folhagem.....	96
<b>Figura 34.</b> Foto representativa apresentando florescência das macrófitas (amadurecim.).	97
<b>Figura 35.</b> Foto demonstrativa da análise visual nos pontos de coleta em consequência da parada de um aerador.....	99
<b>Figura 36.</b> Foto demonstrativa da performance do sistema em relação à clarificação da água.....	100
<b>Figura 37.</b> Gráfico tipo <i>boxplot</i> destacando os valores referentes à DBO <sub>5</sub> .....	101
<b>Figura 38.</b> Comportamento evolutivo da DQO no Sistema Experimental.....	103

<b>Figura 39.</b> Gráfico tipo <i>boxplot</i> destacando os valores referentes à DQO.....	105
<b>Figura 40.</b> Comportamento evolutivo de ST no Sistema Experimental.....	107
<b>Figura 41.</b> Comportamento evolutivo de SST no Sistema Experimental.....	108
<b>Figura 42.</b> Gráfico tipo <i>boxplot</i> destacando os valores referentes à SST.....	110
<b>Figura 43.</b> Comportamento evolutivo de Turbidez no Sistema Experimental.....	111
<b>Figura 44.</b> Gráfico tipo <i>boxplot</i> destacando os valores referentes à Turbidez.....	113
<b>Figura 45.</b> Comportamento evolutivo referente à Cor no Sistema Experimental.....	115
<b>Figura 46.</b> Gráfico tipo <i>boxplot</i> destacando os valores referentes à Cor.....	116
<b>Figura 47.</b> Comportamento evolutivo referente ao pH no Sistema Experimental.....	117
<b>Figura 48.</b> Gráfico tipo <i>boxplot</i> destacando os valores referentes ao pH.....	119
<b>Figura 49.</b> Comportamento evolutivo referente a N-amoniacal no Sistema Experimental	120
<b>Figura 50.</b> Gráfico tipo <i>boxplot</i> destacando os valores referentes ao N-amoniacal.....	123
<b>Figura 51.</b> Comportamento evolutivo referente a N-nitrato no Sistema Experimental.....	124
<b>Figura 52.</b> Gráfico tipo <i>boxplot</i> destacando os valores referentes ao N-nitrato.....	128
<b>Figura 53.</b> Comportamento evolutivo referente ao Fósforo Total-P no Sistema Experim.	129
<b>Figura 54.</b> Gráfico tipo <i>boxplot</i> destacando os valores referentes ao Fósforo Total-P.....	132
<b>Figura 55.</b> Comportamento evolutivo dos Coliformes Totais e <i>E.coli</i> para a situação mais crítica (população de 5500 pessoas).....	135
<b>Figura 56.</b> Foto ilustrativa do comportamento do público junto ao Sistema Experimental	146

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b> - Valores máximos observados, no período de dezembro/1999 a julho/2001, e valores limites adotados para água de reúso em parque temático.....	10
<b>Tabela 3.2</b> – Limites adotados e valores dos parâmetros obtidos da água de reúso do projeto São Caetano referente a março/2001.....	12
<b>Tabela 3.3</b> – Qualidade da água de reúso e tipos de tratamento sugeridos para categorias de reúso de esgoto municipal, segundo USEPA (1992).....	16
<b>Tabela 3.4</b> – Diretrizes microbiológicas recomendadas pela OMS, em 1989, para reúso na agricultura, adaptado de USEPA (1992).....	17
<b>Tabela 3.5</b> – Requisitos de qualidade e tratamento requerido para água de reúso em agricultura e paisagismo, segundo o “Título 22 do Código da Califórnia”.....	18
<b>Tabela 3.6</b> – Classificação das águas doces segundo seus usos preponderantes - Resolução CONAMA nº 357.....	19
<b>Tabela 3.7</b> – Padrões de qualidade para águas superficiais – Resolução CONAMA nº 357.....	20
<b>Tabela 3.8</b> – Características esperadas de efluentes de diferentes processos de tratamento e suas respectivas aplicações.....	21
<b>Tabela 3.9</b> – Papel das macrófitas em leitos cultivados no tratamento de efluentes.....	31
<b>Tabela 3.10</b> – Mecanismos predominantes na remoção de poluentes nos <i>wetlands</i> construídos.....	40
<b>Tabela 3.11</b> – Distribuição relativa de nitrogênio segundo distintas condições.....	43
<b>Tabela 4.1</b> – Resultados da caracterização do esgoto da Estância Árvore da Vida em dois momentos distintos.....	62
<b>Tabela 4.2</b> – Especificações dos Leitos Cultivados ( <i>constructed wetlands</i> ).....	79
<b>Tabela 4.3</b> – Métodos de análise dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos de qualidade do efluente.....	89
<b>Tabela 5.1</b> – Cultivo e adaptação das macrófitas nos leitos cultivados.....	92
<b>Tabela 5.2</b> – Performance de tratamento médio obtido junto: às unidades individuais do Sistema Experimental, ao Sistema Híbrido (global) e ao canal de cloração.....	133
<b>Tabela 5.3</b> – Resultados expressivos de CT e <i>E. coli</i> para situação mais crítica - 5500	

peessoas.....	135
<b>Tabela 8.1</b> – Cálculo dos parâmetros de projeto do LCFH.....	147
<b>Tabela 8.2</b> – Análise Granulométrica da Areia – NBR 7211 (Agregados: determinação da composição granulométrica).....	147

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a – constante associada à concentração e tipo do agente químico

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA – Agência Nacional de Águas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

APHA – American Public Health Association

C – Concentração do desinfetante

CBH-PCJ – Comitê de Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá

CEPIS – Centro Panamericano de Engenharia Sanitária e Ciências do Ambiente

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

Cl<sub>2</sub> - Cloro gasoso

[Ca(OCl)<sub>2</sub>] – Hipoclorito de Cálcio

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPQBA – Centro Pluridisciplinar de Pesquisa de Pesquisas Químicas, Biológicas e Agrícolas

CTO – Capacidade de Transferência de Oxigênio

d<sub>10</sub> = diâmetro efetivo

d<sub>60</sub> = diâmetro a 60

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DBO<sub>5</sub> – Demanda Bioquímica de Oxigênio no quinto dia

DN – Diâmetro Nominal

DNA – Ácido Desoxirribonucléico

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EAV- Estância Árvore da Vida

*E. coli* – *Echeríchia coli*

ECR – Estação de Condicionamento para Reúso

EPA – Environmental Protection Agency

ETA – Estação de Tratamento de Água

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

EUA – Estados Unidos da América  
FEAGRI – Faculdade de Engenharia Agrícola  
IWA – International Water Association  
k – constante de reação  
LCs – Leitos Cultivados  
LCFH – Leito Cultivado de Fluxo Horizontal  
LCFV – Leito Cultivado de Fluxo Vertical  
N<sub>2</sub> – Nitrogênio gasoso  
(NaOCl) – Hipoclorito de Sódio  
NASA – Agência Espacial Norte-Americana  
NMD – Número mais provável  
NH<sub>4</sub> – Íon Amônio  
NH<sub>3</sub> - Amônia  
N-NH<sub>3</sub> – Nitrogênio Amoniacal  
NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N – Nitrato  
NO<sub>2</sub><sup>-</sup> - N – Nitrito  
NO – Óxido Nítrico  
N<sub>2</sub>O – Óxido Nitroso  
N<sub>p</sub> – concentração de organismos reduzidos para uma dada porcentagem em um dado tempo  
N<sub>t</sub> - número de organismo no tempo t  
NTK – Nitrogênio Total  
O<sub>2</sub> – Oxigenio gás  
OMS – Organização Mundial de Saúde  
P – Fósforo  
P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub>, P<sub>5</sub>, P<sub>6</sub> – Pontos de coleta  
PE – População Equivalente  
pH – potencial hidrogeniônico  
PNMA – Política Nacional de Meio Ambiente  
PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos  
PO<sub>4</sub> – Ortofosfato

PVC – Poli Cloreto de Vinila

q – constante relacionada com o poder do desinfetante

RAC – Reator Anaeróbio Compartimentado

RMC – Região Metropolitana e Campinas

SBR - Sequential Batch Reactor

SINGREH – Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SS – Sólidos Suspensos

SST – Sólidos Suspensos Totais

t – tempo associado à equação de Chick

$t_p$  – tempo necessário para se atingir uma determinada porcentagem de redução constante

TDH – Tempo de Detenção Hidráulica

THM – Trihalometanos (mantida a nomenclatura americana)

TSM – Tanque Séptico Modificado

UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket (mantida a nomenclatura americana)

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

USEPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

WEF – Water Environmental Federation

WPCF – Water Pollution Control Federation

## RESUMO

SANTOS, R.M.F. Pós-Tratamento de Esgoto: Sistema Sequencial de Leitos Cultivados (*constructed wetlands*) Vertical e Horizontal. Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 183 p. Dissertação (Mestrado).

A Região Metropolitana de Campinas – RMC passa hoje por uma situação crítica devido ao comprometimento da qualidade de suas bacias hidrográficas e da forte pressão de demanda. O reúso se mostra como a alternativa mais plausível para satisfazer as demandas menos restritivas, liberando as águas de melhor qualidade para usos mais nobres, como o abastecimento doméstico. Inserida na RMC, mais precisamente na zona rural do Município de Sumaré, encontra-se a área de eventos, Estância Árvore da Vida – EAV. Esta área apresenta uma população fixa de aproximadamente 500 pessoas e uma população variável que pode chegar a até 10.000 pessoas durante os eventos realizados ao longo do ano. Esta propriedade tem como Estação de Tratamento um sistema de Lodos Ativados com disposição do efluente final em corpo d'água. Para melhoria da qualidade do efluente da ETE em funcionamento com vistas ao reúso, este trabalho teve como proposta avaliar um Sistema Sequencial de Pós-Tratamento por Leitos Cultivados (*constructed wetland*). O sistema piloto compreende: três leitos cultivados; dois de fluxo vertical em paralelo seguidos de um de fluxo horizontal, e na sequencia adaptou-se um canal para cloração do efluente. A desinfecção não faz parte do foco principal do trabalho, sua conotação foi de uma proposta inicial com vistas a estudos posteriores de um dispositivo simples e de baixo custo, que permita a aplicação do desinfetante sem a utilização de energia elétrica. As etapas de campo, construção, cultivo das macrófitas (*Typha sp.*) e avaliação do sistema, transcorreu ao longo de 11 meses. Os três leitos, construídos de fibra de vidro e possuíam a mesma área superficial, 2,75m<sup>2</sup>. Em termos operacionais, o sistema teve ótimo desempenho, não apresentou problemas de ordem hidráulica, indícios de colmatação do meio filtrante, odores ou surgimento de plantas invasoras. Os resultados obtidos ao longo da pesquisa apontaram: (i) Potencialidade do Sistema Sequencial (LCFVs seguidos de LCFH) na remoção de 74% de DQO, 88% de P, 97% de Turbidez, 93,5% de Cor, 93,85% de SST; (ii) Remoção de Nitrogenio amoniacal de 57,8% e acréscimo de nitrato de 40% nos LCFVs com maciço filtrante de 0,80m de altura (0,07m de brita 1 no topo, 0,60m de areia média no meio, 0,13m de brita1 no fundo); (iii)

Indicação da ocorrência da nitrificação no LCFH com o crescimento de 48,6% da DBO<sub>5</sub> e 13% de nitrato; iv) Perfeita adaptação das macrófitas nos três leitos. Assim, recomenda-se a utilização de Sistema Sequencial de Leitos Cultivados (*constructed wetlands*) de Fluxo Vertical e Horizontal associado a lodos ativados tratando esgoto doméstico, entretanto, para o reúso do efluente, uma etapa de desinfecção criteriosa é altamente recomendável.

**Palavras-chave:** pós-tratamento de esgoto; nitrificação-denitrificação; macrófitas; reúso, desinfecção.

## ABSTRACT

SANTOS, R.M.F. Post-Treatment of Sewage: Sequential System of Vertical and Horizontal Constructed Wetlands. Campinas, Faculty of Agricultural Engineering, State University of Campinas, 2009. 180 p. Master in Science dissertation.

The Metropolitan Region of Campinas – MRC faces nowadays a critical situation due to the damaged water quality of the hydrographical basins and its high demand. The reuse appears to be the most plausible alternative to satisfy the less restrictive demands, setting free the water of the best quality to nobler uses, like domestic supply. The area of events Estância Árvore da Vida – EAV is located in the MRC, precisely in the countryside of Sumaré City. This area has a fixed population of about 100 people and a fluctuating population that can reach the amount of 10.000 during the events in the whole year. The property has as a Treatment Station a system of Activated Mud with final effluent disposition in river. In order to improve the quality of the functioning ETE's effluent aiming the reuse, the present work looks forward to evaluating an Integrated System of Post-Treatment by Constructed Wetlands. The pilot system comprehends: three constructed wetlands, two of vertical in parallel flow followed by one of horizontal flow and an effluent's chlorination canal. The disinfection does not consist in the main focus of this work; it's connotation was of an initial proposal looking forward to later studies on a simple and low-cost device, which allows the application of the disinfectant without using electric energy. The field's steps, construction, macrófitas' cultivation *Thypha* sp. and the system evaluation, occurred during 11 months. The three bottom places were built of glass fiber and they had the same superficial area, 2,75m<sup>2</sup>. In operational terms, the system had a great performance; there were no hydraulics problems, no clogging of the filtering environment, smelling or rising of invaders plants. The obtained results during the research pointed: (i) Sequential System Potential (LCFVs followed by LCFH) by the removing of 74% of COD, 88% of P, 97% of Turbidity, 93,5% of Color, 93,85% of SST; (ii) Amoniacal nitrogen removing of 57,8% and 40% increasing of nitrate on the LCFVs with 0,80m of filtering material (0,07m of gravel on the top, 0,60m of tiny sand on the middle and 0,13m of gravel on the bottom); (iii) Indication of nitrification occurrence on LCFH with 48,6% growing of BOD<sub>5</sub> and 13% of nitrate; iv) Perfect adaptation of the macrophytes on the three bottom places. Therefore it's recommended the use of the

Sequential System of constructed wetlands of vertical and horizontal flow associated to activated mud treating domestic sewer, however for the effluent's reuse it's highly recommended a rigorous disinfection procedure.

**Keywords:** post-treatment of sewage; nitrification-denitrification; macrophytes; reuse; disinfection.

## 1 – INTRODUÇÃO

O município de Sumaré está inserido na Região Metropolitana de Campinas (RMC), uma das regiões mais desenvolvidas do Estado de São Paulo. Essa região enfrenta uma das piores crises pelo uso da água devido à escassez quantitativa e qualitativa de seus recursos hídricos frente à elevadíssima demanda para atender a usos conflitantes nas regiões metropolitanas de São Paulo e de Campinas. Nessas condições, o reúso mostra-se como uma alternativa para atender as demandas menos restritivas quanto à qualidade da água, permitindo que a água tratada proveniente das estações de tratamento de esgoto possa ser aplicada para fins não potáveis, liberando a água de melhor qualidade para usos mais nobres, como o abastecimento doméstico.

Uma situação potencial de estudo para geração de tecnologia que possa atuar na minimização da situação crítica das bacias hidrográficas dessa região encontra-se na área destinada à realização de eventos, Estância Árvore da Vida - EAV, localizada na zona rural do município de Sumaré/SP, que além do potencial de divulgação, busca através de planejamento e tecnologias apropriadas, resolver o problema do grande volume de água utilizado na rega de seus jardins. O possível reúso do efluente da ETE em funcionamento na área pode ser, neste caso, uma alternativa viável. Nesse sentido vale ressaltar que cuidados especiais devem ser tomados quando ocorre contato direto da água de reúso com o público (HESPANHOL, 2001); disso decorre a grande importância de um tratamento adequado do efluente em relação ao uso proposto, devendo-se conhecer os riscos que podem apresentar à saúde e ao meio ambiente.

Para melhorar a qualidade do efluente da ETE em funcionamento com vistas ao reúso, pretendia-se utilizar um sistema que agregasse simplicidade, baixo custo de implantação/operação e harmonia com o meio ambiente. Muitos são os sistemas simplificados de tratamento de esgoto, destacando-se os tanques sépticos, as lagoas de estabilização, os reatores anaeróbios, a disposição no solo e os leitos cultivados com macrófitas ou “*constructed wetlands*”. Dentre esses sistemas são destacados no presente trabalho os Leitos Cultivados, como pós-tratamento. Esses sistemas propiciam meios favoráveis à remoção de cor, turbidez, nitrogênio (nitrificação-denitrificação), fósforo e microorganismos patogênicos. Além da simplicidade conceitual, os LCs se sobressaem por se tratar de sistemas naturais, eficientes e que não demandam energia elétrica. Eles podem ser incorporados à paisagem e encontram no Brasil excelentes condições climáticas para sua implantação.

Avaliou-se um Sistema Sequencial de Pós-Tratamento por Leitões Cultivados (*constructed wetland*). O sistema piloto compreende: três leitões cultivados; dois de fluxo vertical em paralelo e um de fluxo horizontal. Na sequência foi adaptado aos leitões um canal para cloração do efluente com vistas ao reúso.

Ressalta-se que os leitões cultivados correspondem à etapa principal do estudo, e a etapa da desinfecção, apesar de fundamental na prática do reúso, seu desenvolvimento ocorreu no sentido de se buscar subsídios preliminares utilizando um dispositivo de fácil operação e baixo custo para melhorar o efluente final dos leitões cultivados, onde as aplicações do desinfetante pudessem ser controladas sem o uso de energia elétrica e ao mesmo tempo se agregasse à simplicidade dos leitões. Assim, os resultados obtidos, sem muitos critérios, deram a essa etapa uma conotação apenas de proposta inicial para o aprofundamento de estudos posteriores.

O aprofundamento dos estudos em dispositivos simplificados de desinfecção pode complementar o tratamento do sistema sequencial de leitões cultivados e favorecer a prática do reúso, bem como, o acesso a tecnologias de tratamento de esgoto em regiões carentes ou onde a energia elétrica é de difícil acesso, como a zona rural.

## **2 – OBJETIVOS**

### **2.1 – Geral**

Avaliação de um Sistema Sequencial de Pós-Tratamento por Leitos Cultivados (*constructed wetland*), com vistas ao reúso do efluente de um sistema de lodo ativado.

### **2.2 – Específicos**

1 – Avaliar o desempenho de tratamento de três Leitos Cultivados; 02 (dois) de fluxo vertical em paralelo seguidos de (01) um de fluxo horizontal;

1.1 – Avaliar o desempenho dos leitos cultivados quanto a diversos parâmetros físico-químicos e microbiológicos;

1.2 – Avaliar o potencial de nitrificação-denitrificação do sistema sequencial.

### **3 - REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1 - Escassez hídrica**

As crescentes demandas de água estão ocasionando problemas aos recursos hídricos em muitas partes do mundo. Em alguns casos, o uso indiscriminado da água tem chegado até ao secamento total de rios, açudes, lagos e aquíferos. Lamentavelmente, grande parte da água extraída para as atividades humanas, de qualquer que seja a fonte, é utilizada de maneira muito ineficaz. Essa cultura de abundância serviu durante muito tempo como suporte à cultura do desperdício da água disponível, à não realização dos investimentos necessários para seu uso e proteção mais eficientes, e à sua pequena valorização econômica.

O elevado nível de desenvolvimento econômico e urbano tem impacto direto na demanda por infra-estrutura, quais sejam: habitação, transporte, comunicação, energia e saneamento básico. Nesse contexto, a água é um recurso natural que tem papel essencial, sendo necessária não apenas para aplacar a sede e para as ações de higiene da população, mas tendo também participação fundamental na agricultura, na agropecuária e em processos industriais. Ela é utilizada das mais diversas formas e depois, tradicionalmente, é lançada nos rios e córregos, carregando toda sorte de resíduos líquidos e sólidos. A água é, portanto, um fator limitante ao desenvolvimento econômico. Na sua falta é impossível produzir, urbanizar.

Nesse contexto o Brasil é um país que tem uma posição privilegiada perante a maioria dos países quanto ao seu volume de recursos hídricos. Entretanto, vale ressaltar que, mais de 73% da água doce disponível do País encontra-se na Bacia Amazônica, que é habitada por menos de 5% da população. Portanto, apenas 27% dos recursos hídricos brasileiros estão disponíveis para 95% da população (ANEEL; ANA, 2002).

Os problemas de escassez hídrica no Brasil decorrem, fundamentalmente, da combinação do crescimento exagerado das demandas localizadas e da degradação da qualidade das águas. Esse quadro é uma consequência do aumento desordenado dos processos de urbanização, industrialização e expansão agrícola, verificada a partir da década de 1950 (ANEEL; ANA, 2002).

Na atualidade Brasileira é evidente o crescimento dos conflitos entre os diversos usuários dos recursos hídricos. Exemplos em grande escala podem ser observados na bacia do rio São

Francisco, onde as projeções de demanda de água para a irrigação, navegação, para o projeto de transposição, abastecimento humano e de animais e para a manutenção dos atuais aproveitamentos hidrelétricos mostram-se preocupantes quanto à disponibilidade de água do rio (ANEEL; ANA, 2001).

Mierzwa (2002) destaca que o desenvolvimento harmônico de todas estas atividades só é possível quando a disponibilidade dos recursos hídricos excede, significativamente, as demandas mais exigidas. À medida que a relação entre disponibilidade hídrica e demanda vai diminuindo, a probabilidade de surgimento de conflitos entre os diversos usuários dos recursos hídricos, bem como o surgimento de stress ambiental, vai se tornando mais acentuada.

Nessas condições, afirma Hespanhol (2001), o conceito de “substituição de fontes”, se mostra como a alternativa mais plausível para satisfazer as demandas menos restritivas, liberando as águas de melhor qualidade para usos mais nobres, como o abastecimento doméstico. Segundo Asano (2001), o reúso de água proporciona uma única e viável oportunidade para aumentar as adicionais fontes para abastecimento de água.

Mancuso & Santos (2003) afirmam que, as tecnologias de tratamento que permitem a reutilização da água despontam em todo o mundo como tecnologias marcantes para minorar o panorama de escassez. Diversos países da Europa, assim como os países industrializados da Ásia, localizados em regiões com falta de água exercem extensivamente a prática de reúso urbano não potável. Entre esses, o Japão vem utilizando efluentes secundários para diversas finalidades. O uso de esgotos, particularmente no setor agrícola, vem se constituindo em um importante elemento das políticas e estratégias de gestão de recursos hídricos.

Segundo Asano (2001), a utilização de efluentes na agricultura já vem sendo praticada por muitos séculos em várias partes do mundo, e a ampliação em irrigação de áreas urbanas tem sido implementada com sucesso há mais de 30 anos. O que já havia sido ressaltado por Crook (1987) quando afirmou que a utilização da água reciclada para irrigação urbana já estava de tal forma difundida e possuía tantos atrativos econômicos e ambientais que sua adoção vinha progredindo rapidamente, mesmo onde normas e regulamentos ainda não haviam sido adotados.

O prefácio de *Water Science and Technology*, vol. 43, nº 10 (2001) ressalta que o reúso garante alternativa segura para o fornecimento de água, reduz a carga poluidora e oferece uma

forma de desenvolvimento mais sustentável. Assim, o aproveitamento e reúso de água vem se tornando um importante aspecto no gerenciamento dos recursos hídricos e políticas ambientais.

### 3.2 – Reúso de água

A água, segundo Braga *et al.* (2002), é um recurso renovável através do ciclo hidrológico. Quando reciclada por sistemas naturais, é limpa e segura, sendo deteriorada a níveis diferentes de poluição por meio da atividade antrópica. Entretanto, uma vez poluída, a água pode ser recuperada e reusada para fins benéficos diversos.

Genericamente, águas residuárias são águas remanescentes de qualquer tipo de uso: doméstico, público, agrícola, etc. Correspondem, sobretudo, a esgotos e águas servidas de residências e de estabelecimentos comerciais, tendo, às vezes, pequena parte proveniente de indústrias. (MARA & CAIRNCROSS, 1989 *apud* SARTORI 2004).

Lavrador Filho (1987, *apud* Mancuso e Santos, 2003) sugere, como definição, que o Reúso da Água é o aproveitamento de águas previamente utilizadas, uma ou mais vezes, em alguma atividade humana, para suprir as necessidades de outros usos benéficos, inclusive o original.

Para Ganoulis e Papalopoulou (1996), deve-se fazer uma distinção entre reúso direto e indireto. O reúso indireto não planejado é aquele no qual os esgotos são primeiro lançados em corpos d'água superficiais ou subterrâneos, e são captados à jusante. Os esgotos municipais são normalmente reaproveitados desta forma. O reúso direto é aquele no qual o efluente tratado é diretamente encaminhado ao uso. Este é, na maior parte, o caso de efluentes industriais recolhidos e reutilizados em circuito fechado nos processos industriais, tal como nas indústrias de papel e celulose.

As categorias de reúso de esgoto municipal são as seguintes (USEPA, 1992):

- *Reúso urbano irrestrito* – irrigação de áreas nas quais o acesso do público não é restrito, tais como parques, “playgrounds”, jardins escolares e residenciais, descarga de sanitários, proteção contra incêndio, construção civil, chafariz ornamental;
- *Reúso urbano restrito* – irrigação de áreas nas quais o acesso de pessoas pode ser controlado, tais como campo de golfe, cemitérios e rodovias;

- *Reúso agrícola de culturas alimentícias* – irrigação de safras de alimentos que são destinados ao consumo humano direto, muitas vezes classificado como alimento de consumo cru;
- *Reúso agrícola de cultura não-alimentícia* – irrigação de forrageira para gado, fibras, sementeiras, viveiros, aquicultura;
- *Reúso recreacional irrestrito* – represas e lagos onde nenhuma limitação é imposta ao contato direto em atividades recreacionais como natação;
- *Reúso recreacional restrito* – represas e lagos de água na qual a recreação é limitada à pesca, canoagem e outras atividades de contato indireto ou não prolongado;
- *Reúso ambiental* – uso de água aproveitada para criação de “wetland” artificial e regulação de vazões;
- *Reúso industrial* – água aproveitada para uso em instalações industriais como sistema de refrigeração, reposição de água, água de alimentação de caldeira e água de processo;
- *Reúso em recarga de aquífero* – reposição de aquífero, controle de salinidade e de abaixamento de lençol freático.

Segundo Braga *et al.* (2002), a qualidade da água utilizada e o objeto específico do reúso estabelecerão os níveis de tratamento recomendados, os critérios de segurança a serem adotados e os custos de capital e de operação e manutenção. Assim, uma política criteriosa de reúso, transforma a problemática poluidora e agressiva dos esgotos, em um recurso econômico e ambientalmente seguro.

A questão da adequação da água a determinados usos exige um conhecimento suficiente sobre suas características e seus efeitos, tendo-se em vista os usos pretendidos ou praticados (Blum, 2003). Os usos urbanos não potáveis devem ser considerados como primeira opção de reúso na área urbana. Entretanto, se faz necessário uma série de cuidados, principalmente quando do uso decorrer contato direto com a população, como gramados de parques, jardins, áreas turísticas e campos de esporte regados com águas de reúso. (HESPANHOL, 2003).

Assim, o reúso é uma prática extremamente viável, porém, demanda riscos, o que é confirmado por Blum (2003), quando ressalta a importância de se conhecer os constituintes

presentes nos esgotos que podem representar risco sanitário, tais como substâncias químicas orgânicas e inorgânicas potencialmente tóxicas e microorganismos patogênicos.

No Brasil, experiências de reúso urbano já vêm sendo realizadas; algumas Prefeituras da Região Metropolitana de São Paulo (São Paulo, Barueri, São Caetano do Sul, Carapicuíba, Diadema, Santo André), já utilizam os esgotos tratados pela SABESP (Companhia de Saneamento de Esgoto de São Paulo), das estações de: Barueri, Parque Novo Mundo e São Miguel Paulista, na limpeza de ruas e pátios, na irrigação de gramados e rega de áreas verdes, na desobstrução de redes de esgotos e águas pluviais assim como na limpeza de veículos. Apenas para estes usos, são utilizados 34 milhões de litros de água de reúso por mês, a um custo bastante reduzido: R\$ 0,36 (trinta e seis centavos) por metro cúbico de água consumida (portal da SABESP – [www.sabesp.com.br](http://www.sabesp.com.br) – 24 de maio de 2006).

A distribuição da água de reúso para estes municípios é realizada através de caminhões pipa, devidamente identificados.

Mancuso e Santos (2003) apresentam como exemplos bem sucedidos, o projeto de reúso em parque temático nas proximidades da cidade de São Paulo e o projeto realizado pela Sabesp em parceria com a prefeitura do município de São Caetano do Sul/SP.

Segundo Mancuso e Santos (2003), o projeto do reúso no parque temático foi desenvolvido tendo como premissa a possibilidade de recebimento de até trinta mil visitantes por dia, em condições de pico. Dependendo da época do ano, a frequência pode oscilar muito e, como consequência, a vazão do efluente apresenta um comportamento equivalente.

No parque temático, esgoto bruto proveniente dos sanitários, bares e restaurantes é tratado por processos de lodo ativado, não convencional, com separação da biomassa feita por membranas de microfiltração do tipo oco – *hollow fiber* – autolimpantes, submersas no tanque de aeração seguido por desinfecção com hipoclorito de sódio. O efluente tratado, armazenado em reservatório, conduzido através de sistema duplo de distribuição para uso em descargas sanitárias e irrigação de jardins e gramados. A qualidade do efluente tratado e limites adotados no projeto são apresentados na Tabela 3.1.

A ausência de uma classificação específica para reúso de água em parques temáticos, na literatura especializada, segundo Mancuso e Santos (2003), conduziu à adoção da mesma

classificação de água para fins urbanos e domésticos, compatível também com o uso em descargas sanitárias, lavagem de pátios e rega de jardins<sup>1</sup>.

Conforme ressalta Mancuso e Santos (2003), com base na literatura, a água de reúso para esse tipo de empreendimento deve ter alto grau de tratamento e desinfecção, não podendo ter patógenos por causa de sua acessibilidade ao público. Devem, também, ser evitadas as ligações cruzadas (*cross connections*) com o sistema de água potável, tornando-se absolutamente necessário o emprego de sistemas duplos de distribuição para a água de reúso e para a água potável.

---

<sup>1</sup> MANCUSO e SANTOS (2003), Foram consultadas a Water Environment Research Foundation (Assessment Report, Water Reuse. USA, 1994) e a Environmental Protection Agency – EPA. (Manual Guidelines for Water Reuse. Washington, 1992).

**Tabela 3.1** - Valores máximos observados, no período de dezembro/1999 a julho/2001, e valores limites adotados para água de reúso em parque temático.

Parâmetro <sup>(1)</sup>	Esgoto Bruto	Água de Reúso	Limite
pH	7,16	7,9	6,5 – 8,5
Cor (uC)	-	10	< 15
Turbidez (NTU)	-	0,5	≤ 5
Cloro residual	-	-	0,5
DQO	620	40	≤ 60
DBO	403	3,2	-
Óleos e graxas	350	< 0,1	ausente
Nitrogênio Amoniacal	4,15	0,96	-
Nitrogênio Total Kjeldahl	5,04	1,12	-
Sólido em Suspensão Totais	-	-	≤ 5
Fósforo Total	3,17	1,0	-
Ortofósforo	0,67	0,62	-
Coliformes Totais (NMP/100mL)	-	ausente	≤ 2,2
Coliformes Fecais (NMP/100mL)	-	ausente	ausente
Ovos de helmintos (nº de ovos/L)	-	ausente	≤ 1
Cistos de protozoários (nº cistos/L)	-	ausente	-

Adaptado de MANCUSO e SANTOS (2003). (1) valores em mg.L<sup>-1</sup>, salvo quando indicado.

A experiência da Sabesp em reúso urbano, denominado Projeto São Caetano, utiliza o efluente de Tratamento de Esgoto - ETE ABC, tratado por processo de lodo ativado convencional, de eficiência superior a 90% de remoção de DBO seguido de tratamento na Estação de Condicionamento para Reúso – ECR, que consiste em filtragem grosseira com filtros-cestos, pré-cloração com hipoclorito de sódio, coagulação e floculação com policloreto de alumínio, filtragem fina por filtro de pressão dupla-camada (antracito e areia) e pós-cloração, também com hipoclorito de sódio.

O efluente tratado na ECR – (31 L.s<sup>-1</sup>) é parcialmente usado em atividades internas da ETE (17 L.s<sup>-1</sup>) como água de selagem de bombas, água de lavagem de pátios, irrigação de gramados e

água de quebra escuma nos tanques de aeração, o restante ( $14 \text{ L.s}^{-1}$ ) é disponibilizado a um custo de R\$ 0,30/m<sup>3</sup>, ao município de São Caetano do Sul para usos externos, com fornecimento através de caminhão-pipa. A água de reúso é aplicada na rega de ruas sem calçamento (no controle de poeira), jateamento de lodos e detritos acumulados nas ruas após chuvas fortes, lavagens de ruas após feiras livres, desobstrução de redes coletoras de esgoto e galerias pluviais, lavagem de prédios, pátios, jardins, praças e veículos.

Os parâmetros adotados no Projeto São Caetano, baseados na Legislação do Estado Califórnia– Estados Unidos e nas recomendações da OMS, assim como a qualidade obtida do efluente secundário pós-tratado para reúso, são apresentadas na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2** – Limites adotados e valores dos parâmetros obtidos para água de reúso do Projeto São Caetano – referente a março/2001.

Parâmetro <sup>(1)</sup>	Água de Reúso	Limite
pH	7,9	6,5 – 8,5
Cor (uC)	17	< 10
Turbidez (NTU)	5,82	< 2 NTU /24 horas e nunca > 10 NTU
Cloro Total	14,1	> 7
DQO	18	-
Dureza (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	93,3	-
Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	40,9	-
Nitrogênio amoniacal	ND <sup>(2)</sup>	-
Nitrogênio Total Kjeldahl	ND	-
Nitrato	20,5	-
Nitrito	< 0,004	-
Sólidos em Suspensão Totais	6	-
Sólidos em Suspensão Fixos	4	-
Sólidos em Suspensão Voláteis	2	-
Ortofosfato	1,46	-
Compostos orgânicos voláteis	ND	ausentes
Coliformes Totais (NMP/100mL)	-	< 2,2, não deve ser > 23 em mais de 1 resultado/30 dias
Coliformes Fecais (NMP/100mL)	< 2	ausentes
Protozoários (nº/L)	ausentes	ausentes

Adaptado de MANCUSO e SANTOS (2003). (1) valores em mg.L<sup>-1</sup>, salvo quando indicado; (2) ND: não detectado.

### 3.2.1 – Atual Regulamentação para o Uso e Reúso de Água no Brasil

O reúso de água surge como um instrumento adicional para a gestão dos recursos hídricos, visando a redução da pressão sobre os mananciais de abastecimento, liberando as águas de melhor qualidade para os fins mais nobres, e trazendo uma série de benefícios específicos aos usuários, tais como o aumento de produtividade agrícola, a redução de custos com a compra de

água e a preservação dos aquíferos subterrâneos. Entretanto, enquanto a prática do reúso se dissemina no Brasil, somente no final novembro de 2005 foi criada a legislação específica para regular o setor, proteger o meio ambiente e a saúde dos grupos de risco. (RODRIGUES, 2005).

Barbosa (2007) ressalta que as normas ambientais existentes no Brasil possuem mecanismos capazes de promover o uso de água reciclada ao limitar a quantidade de água disponível para a população ou ao restringir o despejo de efluentes nos corpos d'água, seja através do seu uso racional, diminuição do consumo ou reúso de água em função da quantidade e da qualidade da água nos corpos d'água. Entretanto, apesar da utilização racional e integrada dos recursos hídricos ser um dos objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos - PNRH - (art. 2º, II), a Lei não prevê o reúso da água como instrumento da Política<sup>2</sup>. Atualmente no Brasil, o único diploma legal que trata especificamente do reúso é a Resolução CNRH nº. 54 de 2005, que estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água<sup>3</sup>.

A Resolução CNRH nº. 54 contempla que “o reúso de água se constitui em prática de racionalização e de conservação de recursos hídricos, conforme princípios estabelecidos na Agenda 21, podendo tal prática ser utilizada como instrumento para regular a oferta e a demanda de recursos hídricos”.

A Resolução prevê as seguintes modalidades de reúso direto não potável de água (art.3º):

- *Reúso para fins urbanos* – utilização de água de reúso para fins de irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil, edificações, combate a incêndio, dentro da área urbana;
- *Reúso para fins agrícolas e florestais* – aplicação de água de reúso para produção agrícola e cultivo de florestas plantadas;
- *Reúso para fins ambientais* – utilização de água de reúso para implantação de projetos de recuperação do meio ambiente;

---

<sup>2</sup> Cabe dizer que, apesar de não prever o reúso de água, a PNRH possui instrumentos como a outorga e a cobrança capazes de induzir ao reúso.

<sup>3</sup> Reúso direto de água: uso planejado de água de reúso, conduzida ao local de utilização, sem lançamento ou diluição prévia em corpos hídricos superficiais ou subterrâneos (Art. 2º, IV, Resolução CNRH nº. 54/05)

- *Reúso para fins industriais* – utilização de água de reúso em processos, atividades e operações industriais; e

- *Reúso na aqüicultura* – utilização de água de reúso para criação de animais ou cultivo de vegetais aquáticos.

Embora a edição dessa resolução já seja uma realidade, isso não significa, no entanto, que a implantação do reúso de água se dará de forma imediata, pois ela ainda carece de regulamentação na maioria dos seus pontos. Um exemplo disso é § 2º do artigo 3º, que dispõe que “as diretrizes, critérios e parâmetros específicos para as modalidades de reúso definidas nos incisos deste artigo serão estabelecidos pelos órgãos competentes”.

A resolução remete aos órgãos integrantes do SINGREH ao dispor sobre a competência para avaliar os efeitos sobre os corpos hídricos decorrentes da prática do reúso e estabelecer instrumentos regulatórios e de incentivo para as diversas modalidades de reúso (art. 4º). Especificamente em relação aos comitês de bacia, estes deverão incentivar o reúso através da cobrança pelo uso dos recursos hídricos (art. 8º I).

Dispõe, também, que os Planos de Recursos Hídricos deverão contemplar, entre os estudos e alternativas, a utilização de águas de reúso e seus efeitos sobre a disponibilidade hídrica (art.6º).

Conforme afirmado por Barbosa (2007), ao se trazer a prática do reúso para o ordenamento jurídico brasileiro, um passo muito importante foi dado, entretanto, ainda faltam mecanismos que possibilite sua efetiva implementação. Fink e Santos (2003) já questionavam a falta de preocupação específica com a disciplina jurídica do reúso de água, ressaltando que essa lacuna podia dar a impressão de que, para o legislador brasileiro, depois de utilizadas as águas, seu descarte na forma de esgotos domésticos ou efluentes industriais era um problema secundário.

No âmbito dessa questão, pode-se dizer que a gestão de recursos hídricos na atual legislação brasileira possui princípios e instrumentos que não só incentivam o reúso da água como forma de utilização racional e de preservação ambiental, como também, possibilitam sua prática. É muito pertinente a colocação feita por Fink e Mancuso (2003), quando chamavam atenção para alguns instrumentos que buscam minimizar as perspectivas sombrias de “amanhã”; o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de garantir economia de recursos ambientais e a racionalização do uso desses recursos. Esses dois instrumentos se inserem com muita ênfase no tema reúso de água.

É importante ressaltar que dentre os princípios da PNMA estão os incentivos ao estudo e à pesquisa de tecnologias orientadas para o uso racional e a proteção dos recursos ambientais e a racionalização do uso do solo, do subsolo, da água e do ar (art. 2º, VI e II). E dentre os objetivos a serem alcançados pela Política estão o desenvolvimento de pesquisa e tecnologias nacionais orientadas para o uso racional de recursos ambientais e a preservação e restauração dos recursos ambientais com vistas a sua utilização racional e disponibilidade permanente, concorrendo para a manutenção do equilíbrio ecológico propício à vida (art. 4º, IV e VI)<sup>4</sup>

É importante ressaltar, também, que ao se disseminar a prática do reúso sem que haja uma regulamentação específica sobre o assunto, com mecanismos que possibilite sua efetiva implementação, pode comprometer tantos os benefícios, quanto a saúde pública e o meio ambiente.

Rodrigues (2005) resalta que, no mundo, alguns países que detêm experiência com o reúso de água, na medida em que este foi sendo praticado, estabeleceram e aprimoraram, ao longo do tempo, diretrizes nacionais e/ou regionais, exigência ou não de autorizações, padrões requeridos para cada tipo de uso e demais condições de implementação, considerando sempre que possível, as especificidades locais. Esse mesmo direcionamento deve ser tomado pelo Brasil.

O conhecimento do direcionamento tomado por países em que o reúso já faz parte da sua rotina há mais tempo que no Brasil é de grande importância para que se possa entender quais os caminhos que cada um tomou, bem como as dificuldades encontradas, a fim de facilitar o direcionamento das mesmas questões no Brasil. Assim, segundo Rodrigues (2005), em função da imaturidade, no Brasil, em relação a projetos de reúso de água, e a deficiência de estudos epidemiológicos em relação a conseqüências desta prática, em um primeiro momento, será necessário adotar parâmetros internacionais, visando fundamentalmente a proteção à saúde e ao meio ambiente, que deverão ser brevemente adequados à realidade local, sob o risco de inviabilizarem a disseminação do reúso de águas no país.

---

<sup>4</sup> O objetivo de preservar e restaurar os recursos ambientais com vistas à sua utilização racional e disponibilidade permanente consagra princípios internacionais contidos na Declaração de Estocolmo de 1972, parágrafos 12, 18 e 20 e Declaração do Rio de Janeiro de 1992, parágrafo 9º (FINK e SANTOS, 2003; BARBOSA, 2007)

### 3.2.2 - Algumas Recomendações e Regulamentos Internacionais para Reúso utilizados no Brasil

A agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – USEPA (1992), além de dividir o reúso em categorias, sugere os requisitos mínimos de qualidade da água de reúso para cada tipo de aplicação, assim como o tratamento requerido, apresentado na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3** – Qualidade da água de reúso e tipos de tratamento sugeridos para categorias de reúso de esgoto municipal, segundo USEPA (1992).

<b>Categoria de reúso</b>	<b>Tratamento</b>	<b>Qualidade da água de reúso</b>
Reúso urbano irrestrito	Secundário, filtração, desinfecção	DBO <sub>5</sub> < 10 mg/L Coliformes fecais: ND/100mL Turbidez < 2 NTU Cl <sub>2</sub> residual: 1 mg/L pH: 6 a 9
Reúso urbano restrito	Secundário e desinfecção	DBO <sub>5</sub> < 30 mg/L SST < 30 mg/L Coliformes fecais < 200/100mL Turbidez < 2 NTU Cl <sub>2</sub> residual: 1 mg/L pH: 6 a 9
Reúso agrícola de culturas alimentícias	Secundário, filtração, desinfecção	DBO <sub>5</sub> < 10 mg/L Coliformes fecais: ND/100mL Turbidez < 2 NTU Cl <sub>2</sub> residual: 1 mg/L pH: 6 a 9
Reúso agrícola de culturas não-alimentícias	Secundário e desinfecção	DBO <sub>5</sub> < 30 mg/L SST < 30 mg/L Coliformes fecais < 200/100mL Turbidez < 2 NTU Cl <sub>2</sub> residual: 1 mg/L pH: 6 a 9
Reúso recreacional irrestrito	Secundário, filtração, desinfecção	DBO <sub>5</sub> < 10 mg/L Coliformes fecais: ND/100mL Turbidez < 2 NTU Cl <sub>2</sub> residual: 1 mg/L pH: 6 a 9
Reúso recreacional restrito	Secundário e desinfecção	DBO <sub>5</sub> < 30 mg/L SST < 30 mg/L Coliformes fecais < 200/100mL Cl <sub>2</sub> : residual 1mg/L pH: 6 a 9
Reúso ambiental	Variável, geralmente secundário e desinfecção	Variável, mas não deve exceder: DBO <sub>5</sub> < 30 mg/L SST < 30 mg/L Coliformes fecais < 200/100MI
Reúso industrial	Secundário ou secundário + desinfecção, depende do uso específico (coagulação química e filtração podem ser necessários)	Depende do tipo de uso, mas geralmente: DBO <sub>5</sub> < 30 mg/L SST < 30 mg/L Coliformes fecais < 200/100mL Cl <sub>2</sub> : 1mg/L
Reúso em recarga de aquífero	Primário para infiltração e percolação Secundário/ por injeção	Variável, dependendo do local e dos usos da água

A Organização Mundial de Saúde, em 1989 (USEPA, 1992), estabeleceu critérios básicos para a proteção dos grupos de riscos associados a esquemas de reúso agrícola e recomendou, para efluentes líquidos, as diretrizes apresentadas na Tabela 3.4. As recomendações são baseadas na conclusão de que os principais riscos do reúso em países em desenvolvimento estão associados às doenças provocadas por helmintos.

**Tabela 3.4** – Diretrizes microbiológicas recomendadas pela OMS, em 1989, para reúso na agricultura. (Adaptado de USEPA, 1992) <sup>(1)</sup>

<b>Categoria</b>	<b>Condições de reúso</b>	<b>Grupos de risco</b>	<b>Nematodos intestinais<sup>(2)</sup> nº ovos/L<sup>(3)</sup></b>	<b>Coliformes fecais nº/100 mL<sup>(4)</sup></b>	<b>Tratamento recomendado para atingir a qualidade microbiológica</b>
A	Irrigação de culturas a serem ingeridas cruas, campos esportivos, parques públicos <sup>(5)</sup>	Operários, consumidores, público	≤ 1	≤ 1000 <sup>(5)</sup>	Lagoas de estabilização em série ou tratamento equivalente
B	Irrigação de cereais, culturas industriais, forragem, pastos e árvores <sup>(6)</sup>	Operários	≤ 1	Não são recomendados padrões	Retenção em lagoas de estabilização por 8 a 10 dias, ou remoção equivalente de helmintos e coliformes fecais
C	Irrigação localizada de culturas da categoria, se não ocorrer exposição de operários e do público	Nenhum	Não aplicável	Não aplicável	Pré-tratamento requerido pela técnica de irrigação, mas não menos que tratamento primário

(1) Em casos específicos, fatores epidemiológicos, socioculturais ou ambientais devem ser levados em consideração e essas diretrizes modificadas de acordo;

(2) *Ascaris*, *Trichuris*, *Necator Americanus* e *Ancilostomus* spp.;

(3) Média aritmética durante o período de irrigação;

(4) Média geométrica durante o período de irrigação;

(5) Um valor diretriz mais restritivo (≤ 200 coliformes fecais/ 100mL) é apropriado para gramados públicos, tais como os de hotéis, com os quais o público tenha contato direto;

(6) No caso de árvores frutíferas, a irrigação deve cessar 2 semanas antes da colheita dos frutos, e estes não devem ser colhidos do chão. Irrigação por aspersão não deve ser usada.

Nos Estados Unidos, além das recomendações apresentadas pela USEPA em 1992, existem poucas leis federais ou regulamento referindo-se diretamente ao reúso de águas residuárias, as recomendações existentes foram desenvolvidas em âmbito estadual. Neste contexto, o Estado da Califórnia foi o pioneiro ao desenvolver suas primeiras regulamentações em 1918, e hoje os critérios vigentes no Estado, sob o “Título 22 do Código da Califórnia”, adotados em 1978 para reúso de águas residuárias, têm servido como base para padrões de reúso em outros Estados e muitos países. Na Tabela 3.5 são apresentadas as diretrizes contidas no “Título 22 do Código da Califórnia” para reúso em agricultura e paisagismo.

**Tabela 3.5** – Requisitos de qualidade e tratamento requerido para água de reúso em agricultura e paisagismo, segundo o “Titulo 22 do Código da Califórnia”

<b>Tratamento</b>	<b>Requisito de qualidade</b>	<b>Tipo de reúso</b>
Primário	SST ≤ 100 mg/L DBO <sub>5,20</sub> ≤ 120 mg/L	Irrigação de cultura de grãos, plantas forrageiras, ração para animais, jardins e vinhedos
Secundário + desinfecção por cloro	SST ≤ 30 mg/L DBO <sub>5,20</sub> ≤ 30 mg/L Coliformes totais ≤ 20/100mL	Irrigação de pastagens para gado leiteiro, campos de golf, cemitério, canteiros centrais de auto-estradas, cinturões verdes e lagos recreacionais paisagísticos
Secundário + desinfecção	SST ≤ 30 mg/L DBO <sub>5,20</sub> ≤ 30 mg/L Coliformes totais ≤ 2,2/100mL	Em lagos recreativos de acesso restrito
Secundário + filtração + desinfecção	SST ≤ 15 mg/L DBO <sub>5,20</sub> ≤ 15 mg/L Coliformes totais ≤ 2,2/100mL	Irrigação de culturas alimentícias, parques, playgrounds, pátios escolares gramados e para lagos recreativos de acesso restrito

Adaptado de MANCUSO e SANTOS (2003).

Observa-se que a regulamentação da Califórnia é consideravelmente mais restritiva do que a orientação da OMS. Além do estado da Califórnia, mais 26 estados americanos possuem regulamentação específica ou orientações para reúso urbano restrito, sendo que 21 destes contemplam também o reúso urbano irrestrito.

Conforme já comentado, no Brasil, a legislação que regulamenta o reúso ainda é muito geral, portanto, até o momento, as avaliações legais relativas a essa prática, têm sido baseadas em legislações de outros países, principalmente, segundo Mancuso e Santos (2003), nos critérios de qualidade para reúso de água da OMS. Entendida como referência mundial, em que pese a necessidade de considerações de caráter regional e de outras naturezas.

Na Tabela 3.6 são apresentadas as classes para águas doces, com seus respectivos usos e reúsos indiretos permitidos, e na Tabela 3.7 são apresentados somente alguns dos parâmetros de qualidade exigidos para cada classe. Vale ressaltar que a legislação de classificação das águas, CONAMA nº. 357, de 2005, não trata diretamente da questão do reúso, entretanto, Mancuso e Santos (2003) citados por Tosetto (2005), ao se referirem à versão anterior da legislação de classificação das águas (CONAMA nº. 20), consideram que este é um instrumento utilizado intimamente ligado ao reúso, justificando que, em primeiro lugar, “se reúso é o reaproveitamento das águas já utilizadas, qualquer utilização que não seja primária constitui reúso. Assim, classes

inferiores de água podem ser chamadas de águas para reúso. Em segundo, porque, se as águas comportam classes definidas segundo os usos preponderantes, é porque leva-se em consideração o reúso para estabelecer classes”. De todas as classes em que são divididas as águas doces, a única que não pode ser indicada para reúso é a Classe Especial, já que, por sua natureza, são reservadas ao uso primário inicial, destinadas ao abastecimento doméstico com desinfecção.

**Tabela 3.6** – Classificação das águas doces segundo seus usos preponderantes - Resolução CONAMA nº 357

Classe	Usos permitidos
Especial	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Abastecimento para consumo humano, com desinfecção;</li> <li>▪ Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; e</li> <li>▪ Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.</li> </ul>
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado;</li> <li>▪ Proteção das comunidades aquáticas;</li> <li>▪ Recreação de contato primário (natação, mergulho, esqui aquático...);</li> <li>▪ Irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; e</li> <li>▪ Proteção das comunidades aquáticas em terras indígenas.</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional;</li> <li>▪ Proteção das comunidades aquáticas;</li> <li>▪ Recreação de contato primário (natação, mergulho, esqui aquático...);</li> <li>▪ Irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto;</li> <li>▪ Aqüicultura e atividade de pesca.</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado;</li> <li>▪ Irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras;</li> <li>▪ Pesca amadora;</li> <li>▪ Recreação de contato secundário; e</li> <li>▪ Dessedentação de animais.</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Navegação; e</li> <li>▪ Harmonia paisagística.</li> </ul>

Adaptado de (TOSETTO, 2005)

Com respeito às condições de lançamento de efluentes em corpos d'água, a resolução CONAMA nº. 357 dispõe que o valor de pH deve estar entre 5 e 9 e a temperatura não deve exceder 40° C. Quanto aos materiais sedimentáveis, estes não devem ser superiores a 1 mL/L; os óleos minerais devem atender o limite de 20 mgL<sup>-1</sup> e os óleos vegetais e gorduras animais até 50 mgL<sup>-1</sup>, e ainda o valor máximo de nitrogênio amoniacal permitido é 20 mgL<sup>-1</sup> N.

**Tabela 3.7 – Padrões de qualidade para águas superficiais – Resolução CONAMA n.º. 357**

Parâmetro	Unidade	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Materiais flutuantes	-	v. a <sup>(1)</sup>	v . a	v . a	v . a
Óleos e graxas	-	v . a	v . a	v . a	(2)
Gosto e odor	-	v . a	v . a	v . a	(3)
Corantes artificiais	-	v . a	(4)	(4)	-
Sólidos dissolvidos	mg/L	500	500	500	-
Coliformes fecais	NMP/100ml	200 <sup>(2)</sup>	1000 <sup>(5)</sup>	2500 <sup>(6)</sup> 1000 <sup>(7)</sup> 4000	-
DBO <sub>5</sub>	mg/L O <sub>2</sub>	3	5	10	-
Oxigênio dissolvido	mg/L O <sub>2</sub>	6	5	4	2
Turbidez	UNT	40	100	100	-
Cor verdadeira	mg Pt/L	natural	75	75	-
pH	-	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0
Fósforo total	mg/L P	0,020 <sup>(8)</sup> 0,025 <sup>(9)</sup> 0,1 <sup>(10)</sup>	0,030 <sup>(8)</sup> 0,050 <sup>(9)</sup> 0,1 <sup>(10)</sup>	0,050 <sup>(8)</sup> 0,75 <sup>(9)</sup> 0,15 <sup>(10)</sup>	-
Nitrato	mg/L N	10	10	10	-
Nitrogênio amoniacal	mg/L N	3,7; pH ≤ 7,5 2,0; 7,5 <pH≤ 8,0 1,0; 8,0 <pH≤ 8,0 0,5; pH > 8,5	3,7; pH ≤ 7,5 2,0; 7,5 <pH≤ 8,0 1,0; 8,0 <pH≤ 8,5 0,5; pH> 8,5	13,3; pH ≤ 7,5 5,6; 7,5 <pH≤ 8,0 2,2; 8,0 <pH≤ 8,5 1,0; pH> 8,5	-

(1) v. a :virtualmente ausentes

(2) toleram-se iridescências

(3) odor e aspecto: não objetáveis

(4) ausência de corantes artificiais que não sejam removíveis por processo de coagulação, sedimentação e filtração convencionais

(5) em 80% ou mais de pelo menos 6 amostras coletadas durante o período de 1 ano, com frequência bimestral

(6) para recreação de contato secundário

(7) para dessedentação de animais criados confinados

(8) ambiente lântico

(9) ambiente intermediário e tributários diretos de ambiente lântico

(10) ambiente lótico e tributários de ambientes intermediários

Na Tabela 3.8 estão contidas algumas características esperadas de efluentes de diferentes processos de tratamento e suas respectivas aplicações. Para obter esses dados, Mancuso e Santos (2003) se basearam em dados de instalações reais e nos trabalhos de Culp (1980)<sup>5</sup> e Richard (1998)<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> CULP *et al.* **Wastewater reuse and recycling technology**. Nova Jersey, Noyes Data corporation, 1980.

<sup>6</sup> RICHARD, D. The cost of wastewater reclamation and reuse. In: ASANO, T. (Ed) **Wastewater Reclamation and Reuse**. Lancaster Technomic Publishing Co. Inc., p. 1335 – 1395, 1998.

**Tabela 3.8** – Características esperadas de efluentes de diferentes processos de tratamento e suas respectivas aplicações.

Processos de tratamento	Característica esperada do efluente	Aplicação
Primário	SST = 80 mg/L; DBO = 120 mg/L	Cultura de grãos, plantas forrageiras, ração para animais, jardins e vinhedos
Lodos ativados convencionais e desinfecção	SST = 20 mg/L; DBO = 20 mg/L Colif. Totais < 23/100mL	Pastagens para gado leiteiro, campos de golfe, cemitérios, canteiros centrais de auto-estradas, cinturões verdes, lagos recreativos paisagísticos, lagos recreacionais de acesso restrito, dessedentação de animais
Lodos ativados seguido por filtros biológicos de alta taxa e desinfecção	SST = 25 mg/L; DBO = 25 mg/L Colif. Totais < 23/100mL	
Aeração prolongada e desinfecção	SST = 10 mg/L; DBO = 10 mg/L N-NH <sub>3</sub> = 5mg/L Colif. Totais < 23/100ml	Onde for requerido o controle de nutrientes no efluente
Secundário, aeração prolongada, tratamento químico, coagulação, sedimentação, filtração e desinfecção	SST = 10 mg/L; DBO = 10mg/L N-NH <sub>3</sub> = 5 mg/L Colif. Totais < 2,2/100mL	Culturas alimentícias, parques, playgrounds, irrigação de pátios escolares gramados e para lagos recreacionais de acesso irrestrito
Secundário, filtração direta e desinfecção		
Aeração prolongada, coagulação química, filtração ascendente por contato e desinfecção		
Secundário, filtração por contato, remoção de fósforo e desinfecção	SST = 10 mg/L; DBO = 10 mg/L N-NH <sub>3</sub> = 1 mg/L; N-NO <sub>3</sub> = 2 mg/L P-PO <sub>4</sub> = 2mg/L Colif. Totais < 2,2 /100mL	Criação de peixes
Remoção biológica de fósforo e nitrogênio num processo de tratamento compartimentalizado e desinfecção		Onde for requerido o controle de nutrientes no efluente
Secundário, filtração por contato, adsorção em carvão e desinfecção	SST < 2 mg/L; DBO < 2 mg/L N-NH <sub>3</sub> < 1 mg/L; N-NO <sub>3</sub> < 2 mg/L P-PO <sub>4</sub> < mg/L; COT < 5 mg/L Colif. Totais < 2,2/100mL	Remoção de nutrientes para o uso em recarga de aquíferos/poços ou bacias de inundação
Secundário, filtração por contato, adsorção em carvão, osmose reversa e desinfecção	SST < 1 mg/L; DBO < 1mg/L NH <sub>3</sub> -N < 1 mg/L; NO <sub>3</sub> -N < 1 mg/L PO <sub>4</sub> < 1 mg/L; COT < 2 mg/L SDT < 5 mg/L Dureza < 10 mg CaCO <sub>3</sub> /L Colif. Totais < 2,2/100mL	Água desmineralizada para reúso industrial
Secundário, calagem, osmose reversa e desinfecção		

Fonte: MANCUSO e SANTOS (2003)

Conforme afirmado por Hespanhol (2003), as águas de qualidade inferior, tais como esgotos, particularmente os de origem doméstica, águas de chuva, águas de drenagem agrícola e águas salobras, devem, sempre que possível, ser consideradas como fontes alternativas para usos menos restritivos. O uso de tecnologias apropriadas para o desenvolvimento dessas fontes constitui hoje, em conjunção com melhoria da eficiência do uso e o controle da demanda, a estratégia básica para a solução do problema da falta universal de água.

### 3.3 - Tratamento de água residuária

Segundo Von Sperling (1996a), os métodos de tratamento podem ser assim descritos:

- *Tratamento Preliminar*: destina-se principalmente à remoção de sólidos grosseiros e areia, no qual os mecanismos básicos são de ordem física como peneiramento e sedimentação, que ocorrem no gradeamento e nos desarenadores, respectivamente.

- *Tratamento Primário*: destina-se à remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis e sólidos flutuantes que passaram pelas unidades de tratamento preliminar, os quais podem ser removidos parcialmente por mecanismos físicos como sedimentação e/ou flotação, como ocorre nos tanques de decantação.

- *Tratamento Secundário*: destina-se à remoção da matéria orgânica dissolvida ou em suspensão através de processos biológicos unitários, no qual a remoção é efetuada por reações bioquímicas realizadas por microorganismos. Dentre esses processos destaca-se o de Lodos Ativados, cujo princípio básico é a recirculação dos sólidos no fundo da unidade de decantação, por meio de bombeamento, para a unidade de aeração, provocando aumento da concentração de bactérias.

- *Tratamento Terciário*: destina-se à remoção complementar de poluentes não suficientemente removidos no tratamento secundário, como nutrientes, patogênicos, sólidos inorgânicos dissolvidos e em suspensão, e de poluentes específicos (usualmente tóxicos ou compostos não biodegradáveis) por processos físico-químicos. São processos como coagulação, floculação, decantação, filtração, adsorção por carvão, calagem, osmose reversa e desinfecção (Mancuso e Santos, 2003). Também se destacam como tecnologias complementares, os sistemas naturais; como infiltração no solo, aplicação lenta no solo, a infiltração rápida no solo, o escoamento superficial no solo, lagoas de estabilização, lagoas de estabilização contendo plantas flutuantes e os alagados (construídos).

Segundo Mancuso (2003), os esgotos domésticos contêm compostos de nitrogênio cujo lançamento no corpo receptor pode causar inconvenientes que vão desde o consumo de oxigênio dissolvido até o aumento da fertilidade das águas, proporcionando proliferação de algas e eutrofização. Os processos químicos e biológicos de tratamento de efluentes podem alterar a forma pela qual o nitrogênio se apresenta, o que poderia eliminar um ou mais inconvenientes.

Porém, a transformação dos compostos amoniacais em nitritos e nitratos, embora elimine os efeitos tóxicos da amônia, bem como sua avidéz pelo oxigênio, não reduz o potencial de eutrofização do efluente.

Sezerino (2006) ressalta que no Brasil existe uma grande lacuna nas ações e serviços de saneamento ambiental. Poucas são aquelas conduzidas no sentido de minimizar problemas ambientais promovidos pelos lançamentos de esgotos domésticos, industriais e agrícolas. O pesquisador coloca que, tomando como parâmetro as ETEs existentes, muitas foram projetadas e são operadas baseadas somente na eficiência de remoção de material sólido, colimetria e de matéria carbonácea – usualmente medida e quantificada, indiretamente, pelo parâmetro demanda bioquímica de oxigênio (DQO). As frações nitrogenadas e fosforadas são ignoradas, sendo sua remoção ocasional devido aos processos físico-químicos e biológicos associados.

Esta defasagem no tratamento dos esgotos, segundo Sezerino (2006), conduz a um panorama, no mínimo preocupante, pois estes nutrientes quando lançados aos corpos d'água receptores, causam sérios desequilíbrios ambientais comprometendo a biota local e a saúde humana. O pesquisador ressalta, também, que os projetos mais recentes das ETEs empregadas no tratamento de esgotos domésticos têm contemplado as etapas de transformação do nitrogênio. Etapas como a nitrificação e a denitrificação estão sendo foco de estudos em unidades do tipo lodo ativado, reatores SBR (*sequential batch reactor*) – conhecido como reator em batelada e reatores de leito fluidizado. Outras unidades como filtros percoladores (*trickling filters*), biofiltros aerados submersos, lagoas de altas taxas e filtros plantados com macrófitas de fluxo vertical (*vertical flow constructed wetland*) vêm sendo empregadas na promoção da primeira etapa de transformação do nitrogênio, ou seja, a nitrificação.

Sezerino (2006) muito bem ressalta que a “era” da remoção do carbono nos efluentes domésticos já foi muito superada nestas concepções de tratamento. As tendências de utilização dos *constructed wetlands*, tanto ao nível de sistemas descentralizados como unifamiliares, conduzem ao dimensionamento e operação baseados na transformação do nitrogênio e na retenção do fósforo, a fim de preservar a qualidade dos corpos d'água e seus usos múltiplos. Quando estes são empregados em conjunto com sistemas de lodos ativados, objetiva-se promover o polimento do efluente, atuando principalmente na remoção de nutrientes (nitrogênio e fósforo).

Embora os estudos sobre Leitos Cultivados com macrófitas (*constructed wetlands*), como alternativa para esgotos domésticos venham sendo realizados desde 1952 por Sidel na Alemanha e popularizado desde os estudos de Wolverton em 1998, poucos são os trabalhos e aplicações para a realidade brasileira. Destaca-se, entretanto, que estes sistemas incorporam ações naturais de depuração dos esgotos e, conseqüentemente, estão diretamente submetidos às ações climáticas locais, sendo necessário estudos regionalizados para que os mecanismos e a performance de tratamento sejam mantidas ao longo do tempo.

Conforme afirmado por Mancuso (2003), o processo de tratamento de águas residuárias por lodos ativados é bastante flexível, podendo ser combinado com outros, quando se deseja tratamento com alta eficiência, razão pela qual é incorporado em vários sistemas de reúso existentes. Entretanto não foi encontrado na literatura estudos desses sistemas associados a Leitos Cultivados (*constructed wetlands*), o que dá ao presente estudo uma conotação ainda mais interessante e importante no âmbito do saneamento.

### **3.3.1 – Leitos Cultivados com macrófitas**

#### **3.3.1.1 - Classificação e parâmetros de projeto**

Os leitos cultivados são classificados como sistema natural de tratamento de águas residuárias, sendo baseados nos alagados, nas várzeas ou “wetlands” naturais que são áreas de solo hidromórfico estando permanentemente inundados ou saturados por águas superficiais ou subterrâneas e onde vegetam várias espécies de plantas que são diretamente dependentes da hidrologia, do meio ambiente e dos nutrientes característicos da região onde se encontram (USEPA., 1988; WOOD & McATAMNEY, 1996). Estes sistemas foram criados para controlar sistematicamente o tratamento e otimizar a habilidade do sistema de várzea em remover ou transformar os poluentes dos efluentes, além de criar um ambiente favorável ao desenvolvimento da vida selvagem.

Classificação dos leitos cultivados segundo o fluxo (Vymazal, 1998; Wood, 1995; USEPA, 1988):

▪ *Leitos Cultivados de Fluxo Superficial (LCFS)* – constituído de canais com algum tipo de barreira superficial, geralmente o próprio solo, que fornece condições de desenvolvimento para as

plantas, e a água flui a uma pequena profundidade (0,1 a 0,3 m). Seus melhores resultados são como tratamento terciário. Nos Estados Unidos o sistema de fluxo superficial é muito utilizado no tratamento de grandes volumes de águas residuárias, principalmente na remoção de nitrogênio e fósforo;

▪ *Leitos Cultivados de Fluxo Subsuperficial (LCFSS)* – são essencialmente filtros lentos horizontais preenchidos com brita ou areia como meio suporte onde as raízes das plantas se desenvolvem. Este sistema mostrou-se eficiente no tratamento secundário de águas residuárias (Roston, 1994; Souza & Bernardes, 1996; Mansor, 1998; Valentim, 2003), porém com baixa taxa de nitrificação. É muito utilizado no tratamento de efluentes de pequenas comunidades, tanto nos Estados Unidos, Austrália e África do Sul (cascalho como meio suporte) quanto na Europa (tecnologia solo-planta);

▪ *Leitos Cultivados de Fluxo Vertical (LCFV)* – filtros de escoamento vertical intermitente preenchidos com brita ou areia. Nível d'água abaixo do meio suporte, impossibilitando seu contato com animais e pessoas. Os primeiros leitos de fluxo vertical surgiram na Europa no ano de 1970 e eram conhecidos como “campos de infiltração” na Holanda e sistema de Seidel na Alemanha, às vezes conhecido como processo do Instituto Max Planck.

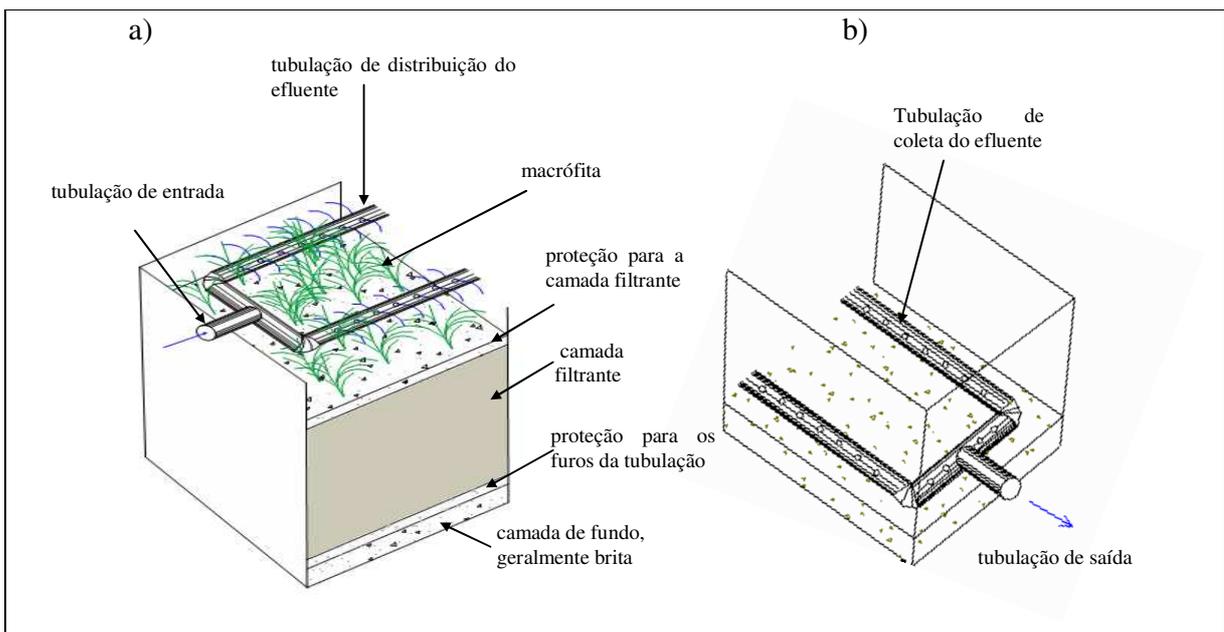
### **3.3.1.2 - Leitos cultivados com macrófita combinados – híbrido**

Os sistemas híbridos, também conhecidos como sistemas combinados, são na verdade associação em série dos leitos cultivados de fluxo vertical e fluxo horizontal.

Nestes sistemas, as vantagens e desvantagens dos LCFV e LCFH podem ser combinadas de maneira a complementar cada um deles individualmente. Segundo Sezerino (2006), é possível produzir um efluente com baixa concentração de  $DBO_5$  o qual é completamente nitrificado e parcialmente denitrificado. A associação mais corrente e aplicada nos EUA, na Alemanha, Áustria e França é constituída de 02 estágios consecutivos de filtros em paralelo seguido de 02 ou 03 estágios de filtros horizontais em série (BOUTIN, 1987). O interesse dessa associação é obter uma boa nitrificação nos verticais que são bem oxigenados, mas também, uma denitrificação nos filtros horizontais, onde se encontram condições de anoxia necessárias a esta reação.

### 3.3.1.2.1 - Leitões Cultivados com Macrófitas de Fluxo Vertical (LCFV)

Os Leitões de fluxo vertical são módulos escavados no terreno, com superfície plana, preenchidos com um material filtrante, composto na maioria das vezes por camadas de areia e brita. O detalhe da Figura 1 apresenta uma concepção geral de um leito cultivado de fluxo vertical com tubulação de distribuição e de coleta do efluente. Esses leitões possuem impermeabilização lateral e de fundo, a fim de impedir que o efluente a ser tratado possa percolar para camadas mais profundas do solo e atingir o lençol freático. Uma camada de proteção para os furos da tubulação de coleta, como bidim ou brita 0 é extremamente necessária, podendo assim, evitar entupimento na tubulação, e ainda atuar na melhoria do efluente. Esta concepção de tratamento é análoga aos “clássicos” filtros de areia, onde o princípio de crescimento de microorganismo – biofilme aderido a um meio suporte é evidente.



**Figura 1.** Detalhes do LCFV (sem escala): a) Tubulação de distribuição do efluente, b) Tubulação de coleta do efluente.

Assim como nos leitões de fluxo horizontal, as macrófitas emergentes são plantadas diretamente no material filtrante sendo o efluente disposto, intermitentemente, sob a superfície do módulo filtrante inundando-o e percolando verticalmente ao longo de todo o perfil vertical do

módulo de tratamento, sendo coletado no fundo por meio de um sistema de drenagem. A forma de aplicação intermitente promove um grande arraste de oxigênio atmosférico para o material filtrante. Quando nova aplicação é realizada, o oxigênio anteriormente introduzido na massa sólida se mantém dentro da mesma e, somado com a nova quantidade de oxigênio arrastada por essa nova aplicação, a quantidade de oxigênio dentro do material filtrante torna-se suficiente para a degradação da matéria orgânica e oxidação da amônia. (COOPER *et al.*, 1996, *apud* SEZERINO, 2006).

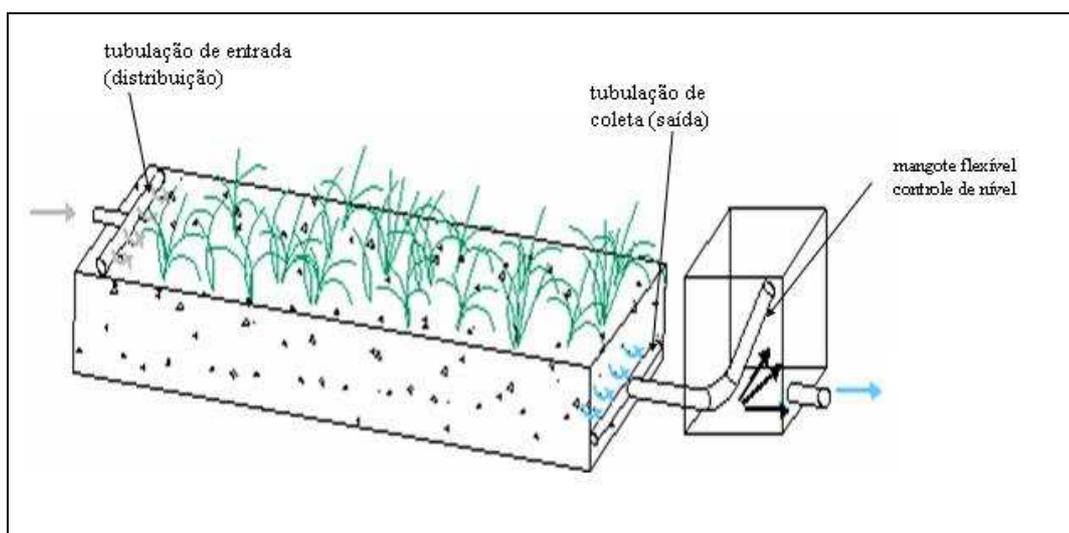
Segundo a *International Water Association* (2000), assim como ocorre nas outras concepções de *wetland* construído com macrófitas emergentes, tem-se uma introdução de oxigênio no material filtrante ou massa líquida promovida pela transferência da parte aérea para as raízes das plantas. Entretanto, a quantidade de O<sub>2</sub> introduzida pela planta é bem inferior à porção difundida/arrastada da atmosfera.

Conforme afirmado por (IWA 2000; Philippi e Sezerino, 2004; Kayser e Kunst, 2005), os sistemas de fluxo vertical vêm sendo aplicados para remoção de DBO<sub>5</sub> SS e para a promoção da nitrificação, devida a potencialidade da aderência de nitrificantes no material filtrante, compondo o biofilme, e a uma entrada de oxigênio superior a demanda de conversão da matéria carbonácea

#### **3.3.1.2.2 - Leitos Cultivados com Macrófitas de Fluxo Horizontal (LCFH)**

Nesta concepção de leitos cultivados, o efluente a ser tratado é disposto na porção inicial do leito, denominada zona de entrada, de onde irá percolar vagarosamente através do material filtrante até atingir a porção final, denominada zona de saída. Esta percolação tende a seguir na horizontal e é impulsionada por uma declividade de fundo. A tubulação de saída é ligada a um mangote flexível ou tubo rotativo que tem o objetivo de controlar o nível do efluente dentro do leito (Figura 2).

Sezerino (2006) ressalta que, durante a percolação, o esgoto entrará em contato com regiões aeróbias, anóxicas e anaeróbias. A camada aeróbia é mais evidente ao redor das raízes das macrófitas, pois estas tendem a transportar oxigênio da parte aérea para as raízes e, sobretudo, ocorrem nesta porção do leito filtrante uma significativa convecção e difusão de oxigênio atmosférico.



**Figura 2.** Esquema do LCFH (sem escala)

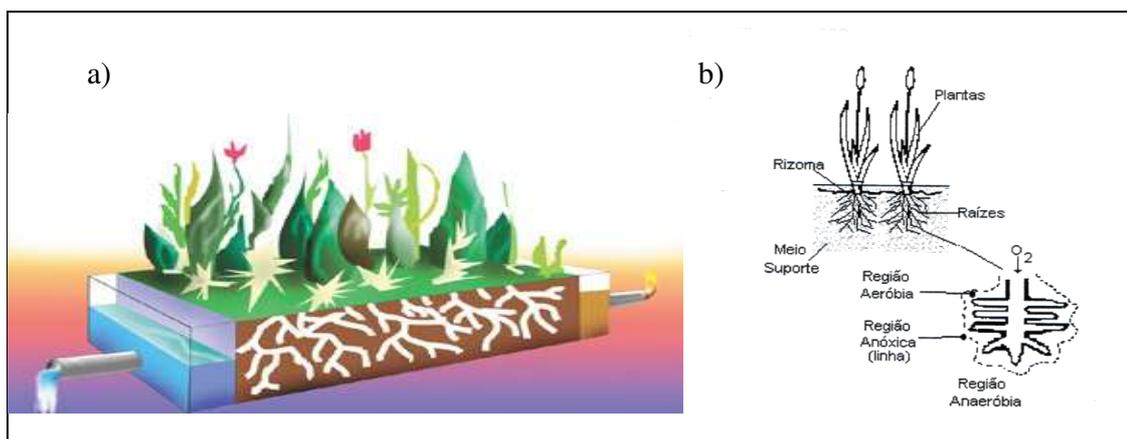
Nos sistemas de fluxo horizontal, o processo de depuração e transformação dos componentes físicos, químicos e biológicos dos esgotos dá-se através de uma combinação de elementos e mecanismos. O princípio básico é a formação de biofilme aderido a um meio suporte e raízes das plantas, onde comunidades de microorganismos aeróbios e anaeróbios irão depurar a matéria orgânica e promover a transferência da série nitrogenada (nitrificação e desnitrificação). O oxigênio requerido é suprido pelas macrófitas e pela difusão atmosférica.

Conforme afirmado por Cooper *et al.* (1996 *apud* Sezerino 2006), o LCFH possui, de forma geral, boa performance na remoção da matéria orgânica ( $DBO_5$  e SS) e nitrificação/desnitrificação, com ênfase no segundo processo de transformação do nitrogênio

### 3.3.1.3 - Elementos Atuantes

Os leitos cultivados (*constructed wetlands*) têm apresentado adaptação em diferentes situações e arranjos, apresentando boa performance no tratamento de efluentes, principalmente os de origem doméstica. Apesar de sua ampla utilização, muitos estudos estão sendo conduzidos a fim de identificar e aperfeiçoar o papel de cada elemento atuante no tratamento, destacando-se o tipo de fluxo empregado, o material filtrante, as macrófitas, os máximos carregamentos afluentes (tanto em nível hidráulico como orgânico), as cinéticas de depuração, a transferência de oxigênio, a estrutura e metabolismo do biofilme formado e a vida útil do sistema.

Os principais elementos componentes dos leitos cultivados com macrófitas associados aos mecanismos de depuração dos efluentes são: *material filtrante - meio suporte e as macrófitas*. A Figura 3 apresenta os detalhes de um leito cultivado, da rizosfera e da transferência de oxigênio para as raízes.



**Figura 3.** Detalhes: a) Leito Cultivado, b) Rizosfera e Transferência de Oxigênio para as raízes

1) *Material filtrante-meio suporte* - Desde os primeiros estudos realizados na Alemanha por Kickuth e colaboradores, os quais empregaram o solo *in natura* como elemento filtrante e de sustentação para as macrófitas, este material filtrante vem merecendo bastante atenção, devido, principalmente, à necessidade de manter as condições hidráulicas para que o processo de tratamento ocorra.

É de grande importância a busca por um material capaz de manter ao longo do tempo boa condição de fluxo aliada a um potencial reativo, ou seja, capaz de promover adsorção de compostos inorgânicos presentes nas águas residuárias, tais como amônia ( $\text{NH}_4$ ) e ortofosfato ( $\text{PO}_4$ ). Entretanto, esta associação não se dá com facilidade; materiais filtrantes como a areia possuem um ótimo potencial de fluxo, porém, nenhuma, ou muito pouca capacidade adsortiva. As argilas possuem alto potencial de adsorção, mas são praticamente impermeáveis. Portanto, a escolha do tipo de material filtrante a ser empregado num leito cultivado está condicionada às finalidades do tratamento.

Conforme afirmado por Sezerino (2006), a escolha do material filtrante a ser empregado em filtros com macrófitas torna-se um dos elementos de projeto e operação que merecem atenção

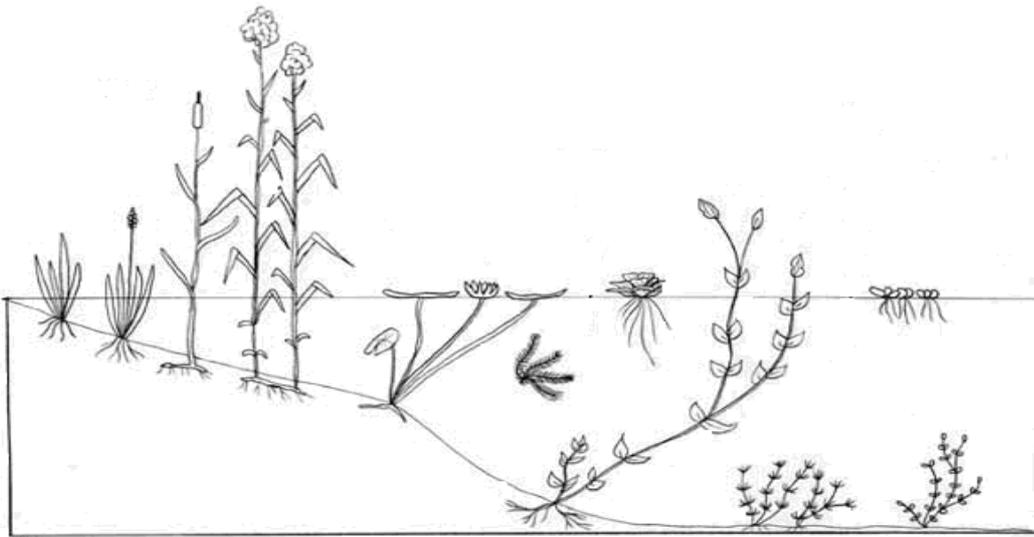
especial, devido, principalmente a dinâmica de fluxo do efluente no sistema. Tão importante quanto a escolha do material filtrante é a definição das cargas afluentes aplicadas, para a manutenção e vida útil do sistema de tratamento.

2) *Macrófitas* - Guntenspergen *et al.* (1988), ressaltam que as várzeas naturais são habitadas por diferentes tipos de plantas adaptadas para o crescimento na água e em solos saturados. Segundo esses pesquisadores, existem vários termos para definir estas plantas devido à ambigüidade nas definições e à complexidade de sua classificação, sendo os termos usuais: hidrófitas, *macrófitas* aquáticas, hidrófitas vasculares, plantas aquáticas e plantas vasculares. De modo geral, o termo *macrófitas* é o utilizado para os sistemas de leitos cultivados por diversos pesquisadores em todo o mundo. (VALENTIM, 1999).

Essas plantas, segundo Valentim (1999), estão divididas em três categorias:

- a) *Flutuantes* – podem estar fixadas ou não ao fundo e sua folhagem principal flutua na superfície da água (Ex: *Lemna sp.*, *Spirodela sp.*, *Eichhornia crassipes*, *Wolffia arrhiza*, *Azolla caroliniana*);
- b) *Submergentes* – crescem sob a água e podem ou não estar fixas por raízes (Ex: *Elodea nuttallii*, *Egeria densa*, *Ceratophyllum demersum*);
- c) *Emergentes* – sua folhagem principal está em contato com o ar e suas raízes estão fixadas ao solo (Ex: *Scirpus sp.*, *Phragmites australis*, *Typha sp.*, *Canna flaccida*, *Eleocharis sp.*, *Juncus sp.*).

A distribuição e a presença destes tipos de *macrófitas* são determinadas por concentração dos nutrientes na água, tipo de sedimento onde estão fixadas, profundidade da lâmina d'água, presença ou não de correnteza, turbidez, ataque de herbívoros e atividades humanas (APHA, 1995; WOOD & McATAMNEY, 1996). Na Figura 4 tem-se uma demonstração das três categorias referida.



**Figura 4.** Diferentes categorias de plantas adaptadas na água e em solo saturado (emergentes, submergentes, flutuantes)

A Tabela 3.9 destaca resumidamente as ações das macrófitas nos leitos cultivados com macrófitas.

**Tabela 3.9 -** Papel das macrófitas em leitos cultivados no tratamento de efluentes

<b>Propriedade das macrófitas</b>	<b>Ação de auxílio no tratamento de esgotos</b>
Parte aérea (tecidos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- atenuação da luminescência = redução do crescimento de fitoplâncton</li> <li>- potencial estético – embelezamento paisagístico</li> <li>- armazenamento de nutrientes</li> </ul>
Tecido da planta em contato com a água (esgoto)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- promoção da filtração</li> <li>- dispõem grande área para aderência de microorganismos</li> <li>- liberação de oxigênio devido a fotossíntese = armazenamento na taxa de degradação aeróbia da matéria orgânica</li> <li>- retirada de nutrientes</li> </ul>
Raízes e rizomas em contato com o solo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- prevenção contra erosão</li> <li>- liberação de oxigênio = auxílio na degradação aeróbia da matéria orgânica e na nitrificação</li> <li>- retirada de nutrientes</li> <li>- liberação de antibióticos</li> </ul>

Fonte: adaptada de (BRIX, 1997; SEZERINO, 2006)

Conforme afirmado por Esteves (1998), todas as plantas, tais como as macrófitas, requerem nutrientes para seu crescimento e reprodução. Estudos sobre a variação mensal ou sazonal da composição química de macrófitas têm mostrado que, em relação a alguns elementos como o fósforo, nitrogênio e compostos como carboidratos, proteínas e lipídios, as concentrações variam constantemente. Estas variações, segundo o pesquisador, estão ligadas à dinâmica da comunidade de macrófitas, à disponibilidade de nutrientes do meio e a fatores climáticos, que possibilitem estocá-los, metabolizá-los, translocá-los ou mesmo excretá-los para o meio ambiente.

É importante ressaltar que existe grande diferença entre macrófitas das regiões temperadas e das regiões tropicais, especialmente em relação à concentração de nitrogênio na biomassa. Segundo Esteves (1998), nas regiões tropicais, a ausência de estações climáticas bem definidas faz com que a dinâmica da comunidade seja bem característica, ou seja, nascimento e morte constante de indivíduos, o que faz com que a dinâmica de retirada e liberação de nutrientes torne-se, também, constante. Por outro lado, em regiões de clima temperado, como o hemisfério norte, ao longo dos meses de abril e maio (primavera) dá-se o surgimento de novos indivíduos a partir dos rizomas. O pesquisador resalta que esses indivíduos caracterizam-se por um intenso metabolismo que têm nesse período, suas necessidades nutricionais garantidas a partir de reservas estocadas nos rizomas.

*2.1) Transferência de Oxigênio* – O tratamento da água residuária é o resultado da integração entre as interações físicas, químicas e biológicas que ocorrem nos leitos por causa da presença do meio suporte, das comunidades bacterianas e das macrófitas.

Os mecanismos de transporte de oxigênio nos *wetlands* construídos são a convecção e difusão atmosférica e a transferência via macrófitas. (COOPER, 2005; IWA, 2000; KAYSER e KUNST, 2005; PLATZER, 1999; VYMAZAL, 2005). Quando o ambiente dos leitos cultivados é predominantemente anaeróbio, as condições aeróbias podem ser conseguidas graças ao fornecimento de oxigênio pelas raízes das macrófitas. O movimento interno do oxigênio para as partes inferiores das plantas serve não apenas para suprir a demanda respiratória dos tecidos das raízes, mas também para oxigenar sua rizosfera. O escape de oxigênio das raízes cria condições de oxidação, que juntamente com condições anóxicas aí presentes, estimulam a decomposição aeróbia do material orgânico, o crescimento de bactérias nitrificantes e a inativação de compostos que seriam tóxicos às raízes das plantas. Dentre estes processos o mais importante e que forma a base científica do LC é a simbiose entre as plantas e os microorganismos aí fixados. Como na

rizosfera ocorre a justaposição de uma região aeróbia (presença de oxigênio) com outra anóxica (presença de nitrato) envoltas em uma grande região anaeróbia têm-se o desenvolvimento de vários tipos de bactérias que motivam o processo de nitrificação-denitrificação. (ARMSTRONG *et al.*, 1990; BRIX, 1994; USEPA, 1988).

As macrófitas fazem a liberação de oxigênio, que ocorre principalmente pelas pontas das raízes, porque dependem do convívio em simbiose com os diversos microorganismos presentes na água. Esta singularidade do LC mostra que macrófitas são de extrema importância para o sistema, sendo vital o conhecimento de suas características, suas habilidades, suas necessidades e seu manejo para o sucesso do tratamento. (VALENTIM, 1999).

O transporte de oxigênio ( $O_2$ ) via convecção ocorre devido a existência de um gradiente de pressão entre o ar e o material filtrante (PLATZER, 1999; KAYSER e KUNST, 2005). Este gradiente, segundo Platzer (1999), é o resultado da aplicação do esgoto na massa sólida do qual, após sua percolação através do maciço filtrante, cria-se um vácuo que então é equalizado com o ar. O pesquisador ressalta ainda que, se o tempo entre o início de aplicação e a completa infiltração do esgoto na massa de solo for menor que 10 minutos, o volume de ar que entra no maciço, via convecção, será igual ao volume de esgoto aplicado.

A transferência de  $O_2$  via macrófitas ocorre, entretanto, a maior parte do oxigênio transportado é utilizado pelas raízes e rizomas para a sua respiração, liberando apenas o excedente. (BRIX, 1997; COOPER *et al.*, 1996; VYMAZAL, 2005). Segundo os pesquisadores, esta quantidade excedente de  $O_2$  junto a rizosfera não é significativa para suprir a demanda da conversão aeróbia da matéria orgânica carbonácea pelos microorganismos componentes do biofilme, muito menos para a oxidação da amônia a nitrato. A quantidade de  $O_2$  introduzida no maciço filtrante pela planta é bem inferior à porção difundida/arrastada da atmosfera (IWA, 2000), sendo, portanto, de grande relevância o balanço de oxigênio necessário à manutenção das condições aeróbias para a oxidação da matéria orgânica e nitrificação.

#### **3.3.1.4 – Pesquisas desenvolvidas em Leitos Cultivados com Macrófitas**

Os chineses provavelmente foram os primeiros a usar as macrófitas no tratamento de águas residuárias, no entanto, cientificamente, o trabalho considerado pioneiro foi realizado em 1952

por Seidel, na Alemanha, que explorou a remoção de fenol por *Scirpus lacustris*, utilizando brita como meio suporte (WOOD & MCATAMNEY, 1994). Seidel realizou, posteriormente, outros experimentos usando leitos preenchidos com brita e cultivados com macrófitas emergentes: *Phragmites australis*, *Iris sp.*, *Schoenoplectus sp.*, *Typha sp.* (HEGEMANN, 1996).

Também na Alemanha, Kickuth nos anos 70, usou leitos cultivados preenchidos com solo de alta quantidade de silte e cultivados com *Phragmites australis* para tratar efluentes municipais. (HEGEMANN, 1996; WOOD & MCATAMNEY, 1994).

Nos Estados Unidos, os leitos cultivados se tornaram populares a partir dos estudos de Wolverton (1988) para a Agência Espacial Norte-americana (NASA), onde o pesquisador testou o uso do tanque séptico associado aos leitos cultivados no tratamento de efluentes de casas não servidas pela rede de captação.

Roston (1994) desenvolveu um sistema para tratar o esgoto doméstico de duas casas de fazenda localizadas no Colorado/Estados Unidos. Ele avaliou o desempenho de dois leitos cultivados com *Typha latifolia* e um outro sem cultivo no tratamento do efluente de um tanque séptico existente na propriedade. Os leitos tinham como meio suporte, brita de 4 a 6 cm de diâmetro. A avaliação ocorreu num período de 06 meses, e os resultados obtidos foram os seguintes: *Leitos cultivados* - redução da DBO de 165 mg/L para 13 mg/L (92%), do NTK de 38mg/L para 10mg/L (74%) e Coliformes Fecais de  $5 \times 10^5$  NMP/100ml para  $3 \times 10^4$  NMP/100ml (94%). *Leitos sem vegetação (testemunha)* – redução da DBO de 165 mg/L para 62 mg/L (62%), do NTK de 38 mg/L para 26 mg/L (32%). Esses resultados evidenciaram a relevância da vegetação na remoção de poluentes. Ao final da pesquisa, Roston concluiu que o sistema integrado de “tanque séptico e leitos cultivados com macrófitas de fluxo subsuperficial” é um conjunto eficiente e barato para o tratamento de esgoto doméstico de áreas rurais e de pequenas comunidades.

Conforme afirmado por Hegemann (1996), na Europa existia em 1996 aproximadamente mil instalações de tratamento baseado nos sistemas naturais servindo grupos de 5 a 1000 habitantes. Os leitos cultivados eram de fluxo subsuperficial cujo meio suporte era solo ou brita.

No Brasil, apesar das inúmeras vantagens que as *constructed wetlands* podem apresentar, esta tecnologia ainda é nova e poucos grupos de pesquisas vêm desenvolvendo trabalhos nesta

área (Salati Jr, *et al.*, 1999). Salati e colaboradores construíram a primeiro *wetland* em Piracicaba com resultados satisfatórios (SALATI JR *et al.*, 1999).

Os pesquisadores Souza & Bernardes (1996) trataram o esgoto doméstico de uma comunidade próxima a Brasília/DF utilizando um reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB) com pós-tratamento em leitos cultivados de fluxo subsuperficial cultivados com *Typha latifolia*. Três leitos foram operados em série e apresentaram boa remoção de nutrientes e matéria orgânica (54% para NTK, 40% para fósforo e 63% para DQO), com o tempo de detenção total de 65,4 horas.

Mansor (1998), avaliou durante os seis primeiros meses de funcionamento o desempenho de 4 leitos cultivados de fluxo subsuperficial (LCFH), construídos em alvenaria de blocos, de área útil de 4,24m<sup>2</sup> e lâmina d'água a 0,35m no tratamento de águas residuárias primárias (lagoa de estabilização) do Centro Pluridisciplinar de Pesquisas Químicas, Biológicas e Agrícolas – CPQBA/UNICAMP. Dois leitos foram cultivados com *Typha dominguensis Pers. x Typha latifolia L.*, sendo um preenchido com brita nº 3 (55-90mm) e outro com nº 4 (90-135); outro cultivado com *Eleocharis fistulosa* e preenchido com brita nº 3 e um testemunha somente preenchido com brita nº 3. A taxa orgânica média aplicada foi de 142,6 Kg DQO/ha.dia, sendo o tempo de detenção 2,5 dias. Os melhores resultados médios mensais na remoção dos poluentes foram obtidos com a brita nº 3, sendo a máxima redução da DQO igual a 82,7% e a máxima remoção de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> igual a 86,4%, obtidas no leito cultivado com *Typha dominguensis Pers. x Typha latifolia L.* A máxima redução de NTK, igual a 91,8%, foi obtida no leito cultivado com *Eleocharis fistulosa*.

Philippi *et al.* (1998) avaliaram um sistema composto por tanque séptico associado a um “*wetland* construído” com *Zizanopsis bonariensis*, implantado no Centro de Treinamento da EPAGRI em Agrônômica/SC, para o tratamento de suas águas residuárias (origem doméstica e agroindustrial). O tanque séptico de 2 câmaras em série (1ª com 9,25m<sup>3</sup> e a 2ª com 4,08m<sup>3</sup>) foi projetado de acordo com a ABNT (1993), seguido pelo leito cultivado de 30m de comprimento, 15m de largura e 0,7m de profundidade, tendo como meio suporte uma mistura de casca de arroz, areia e pedrisco. As remoções médias dos poluentes no tanque séptico para DQO, sólidos totais e SST foram, respectivamente: 33%, 32% e acréscimo de 52%. Para o “*wetland*” as remoções da DQO, sólidos suspensos, nitrogênio total, fósforo total e nitrato foram, respectivamente: 71%, 41%, 78%, 13% e 80%.

Valentim (1999), projetou, construiu e avaliou durante os primeiros 6 meses de funcionamento um sistema composto por um tanque séptico modificado (TSM) seguido por leitos cultivados de vazão subsuperficial na forma retangular e quadrada.

O tanque séptico modificado de três compartimentos em série operou com vazão diária média de 1330 L/dia (9 PE), obtendo redução de DQO entre 17 e 69%, sólidos sedimentáveis de 100%, sólidos suspensos entre 58 e 92%, turbidez entre 67 e 92% e *E. coli* de 0 a 75%. Para os leitos cultivados com macrófitas, os maiores valores de remoção foram encontrados no quadrado plantado com *Eleocharis sp.*, com redução de sólidos suspensos entre 91 e 97%, coliformes totais de 59 a 96%, nitrogênio total Kjeldahl de 35 a 90% e fósforo total de 41 a 65%; o retangular plantado com *Eleocharis sp.*, com redução de DQO entre 70 e 97% e *E. coli* entre 94 e 97%, e o quadrado plantado com *Typha sp.*, com redução de nitrato de 71 a 83%. Quanto à adaptação, as macrófitas apresentaram rápido desenvolvimento e ocuparam toda a área dos leitos, além de suportarem um período de 1,5 meses sem receberem efluente devido aos constantes entupimentos do sistema no período de férias.

Valentim *et. al.* (2000), continuando a pesquisa, monitoraram durante 3 meses o desempenho do sistema para vazões afluentes ao tanque séptico da ordem de 4000L/dia (27 PE) e para vazões constantes do afluente dos leitos cultivados em torno de 400L/dia. Para o tanque séptico modificado a redução média de DQO foi de 46%, de sólidos sedimentáveis de 99%, sólidos suspensos de 82% e turbidez de 81%. Para os leitos cultivados com macrófitas, os maiores valores de remoção encontrados no leito retangular com *Typha sp.*, com redução de DQO entre 79 e 97%, turbidez entre 76 e 96%, coliformes totais de 1 a 3 Log e *E. coli* de 2 Log e nitrato entre 56 e 100%; para o leito retangular com *Eleocharis sp.*, com redução de fósforo total entre 47 e 93%, nitrogênio total Kjeldahl entre 22 e 64%, sólidos suspensos entre 79 e 97%; e nitrogênio amoniacal entre 16 a 40% para o leito quadrado com *Typha sp.* Um dado importante observado pelos autores foi a capacidade do tanque séptico e dos leitos cultivados em suportar a aplicação acidental de compostos de cloro e de óleo mineral utilizado com lubrificante em máquinas.

Mazola (2003) avaliou o desempenho de um RAC de duas câmaras em série (volume total 2,30m<sup>3</sup>, vazão afluente 4,6m<sup>3</sup>/h, TDH de 12h) seguido de 03 leitos cultivados com macrófitas (*Typha sp.* e *Eleocharis sp.*) e 01 utilizado como controle (não cultivado). O formato dos leitos era cilíndrico com volume de 2,0m<sup>3</sup>. Foi utilizado brita 2 como meio suporte e o suprimento de

efluente no sistema corria em batelada. Os tempos de reação de para cada ciclo (enchimento – reação – drenagem) dos LCFV foram de 24, 48, 72 e 96h.

No RAC, as reduções de SSed, SST e DQO foram, respectivamente, 93, 80 e 39%. Houve tendência à estabilização do parâmetro pH, alcalinidade ácidos voláteis, SSsed e SST, contudo, os índices de redução de DQO mantiveram-se muito baixos.

Com respeito aos LCFV, o pesquisador ressalta que o aumento do tempo de reação (até 72h) esteve associado ao aumento dos índices de redução dos parâmetros avaliados. Para o valor máximo, 72h, teve-se redução de: 77% de turbidez, 71% de DQO, 30% de Pt e 60% de  $\text{N-NO}_3^-$ . Segundo o pesquisador verificou-se para as análises de  $\text{N-NO}_3^-$  nos leitos vegetados um aumento de cerca de 10% nas primeiras 24h, que pode ser justificado pela adição de  $\text{O}_2$  devido à intermitência das bateladas. Foi obtido no leito vegetado com *Thypha sp.* os maiores índices de remoções de Pt; para tempos de 72h, 30% e 96h, 25%.

Sezerino (2006) avaliou a potencialidade de filtros plantados com macrófitas no pós-tratamento de efluente de lagoas de estabilização sob condições de clima tropical em Florianópolis/SC. Esse sistema é semelhante aos leitos cultivados com macrófitas, se diferenciando apenas na nomenclatura - *filtros plantados com macrófitas*. O sistema estudado era a combinação de filtros de fluxo vertical e horizontal (sistema híbrido). O sistema compreendia 06 módulos de fluxo vertical e 01 de fluxo horizontal. O meio filtrante dos verticais era de areia e brita, sendo 03 módulos com 0,75m de altura (areia - 0,60m) e 03 módulos com 0,45m de altura (areia – 0,30m). O horizontal era preenchido com areia e recebia o efluente de todos os filtros de fluxo vertical.

As taxas hidráulicas aplicadas foram controladas para que as cargas de SS se mantivessem em 10, 15 e 20gSS/m<sup>2</sup>.d para os V1<sub>60-30</sub>, V2<sub>60-30</sub> e V3<sub>60-30</sub>, respectivamente. Em cada módulo foram aplicadas as seguintes taxas hidráulicas médias:

- V1<sub>60</sub> e V1<sub>30</sub>: 153,70mmd<sup>-1</sup>;
- V2<sub>60</sub> e V2<sub>30</sub>: 230,74mmd<sup>-1</sup>;
- V3<sub>60</sub> e V3<sub>30</sub>: 307,39mmd<sup>-1</sup>.

A seqüência de filtros plantados (sistema híbrido), segundo o pesquisador, apresentou excelente qualidade em termos de remoção de SS oriundo da lagoa anaeróbia (91% de remoção),

com concentração média efluente de  $5,7 \pm 4,4\text{mgSS/L}$ . O pesquisador ressalta que em todos os pares de filtros verticais as cargas afluentes em termos de DQO, SS e NTK foram superiores às aquelas apresentadas na literatura para recomendações de clima temperado, e a nitrificação foi efetiva e não houve indício de colmatação em nenhum filtro de fluxo vertical, durante o período compreendido entre os meses de fevereiro a novembro de 2005, mostrando assim a potencialidade desse tipo de sistema para tratamento aplicado à nitrificação de efluente de lagoa anaeróbia, tratando esgoto doméstico e submetidos às condições de clima subtropical.

O pesquisador ressalta que o filtro de fluxo horizontal apresentou em termos de SS uma linearidade das cargas aplicadas com as cargas removidas, capacidade de tamponamento, excelente qualidade em termos de remoção de bactérias do grupo coliformes, indicando o efluente, inclusive para uso na agricultura sem uso de aditivos químicos. Entretanto, quando se usa areia como meio filtrante, há o risco de escoamento superficial, e conseqüentemente, comprometimento na qualidade do efluente final. O pesquisador ressalta a necessidade de um segundo filtro como reserva, disposto paralelamente ao que está em funcionamento.

#### **3.3.1.4.1 – Pesquisas desenvolvidas em Leitos Cultivados de Fluxo Vertical (LCFV)**

Com respeito aos leitos cultivados de fluxo vertical, Vymazal (1998), destaca em seu artigo que esse tipo de leito ainda é pouco estudado, e coloca que existem poucos LCFV em operação, ressaltando alguns, como em St. Bohaire na França, Oaklands Park na Inglaterra que utilizam LCFV seguido de LCFH; e na Dinamarca e Polônia, onde é utilizado um LCFH de grande tamanho seguido de LCFV.

Apesar disso, vêm crescendo o interesse pelos LCFV, pois estes apresentam alta capacidade de transferência de oxigênio (CTO) com tamanho reduzido das unidades.

Cooper (1998) ressalta que o sistema de LCFV tem como vantagens o grande potencial de nitrificação e de remoção de DQO devido à alta CTO, além de remover algumas bactérias. Como desvantagem, apresenta pouca eficiência na remoção de SST e pode ocorrer colmatação da parte superior do meio filtrante.

Laber *et al.* (1998), monitoraram um sistema constituído de um tanque séptico de 03 câmaras, seguido de um leito cultivado de fluxo horizontal (LCFH) e depois de um leito cultivado de fluxo vertical (LCFV) para tratar a água residuária de um hospital em

Dhulikhel/Nepal. A vazão diária foi de 20m<sup>3</sup>/dia, tendo o LCFH uma área de 140m<sup>2</sup>, profundidade de 60cm e o LCFV com área de 120m<sup>2</sup>, profundidade de 90cm e ambos preenchidos por brita. Neste experimento, os autores chegaram à conclusão de que para uma mesma remoção de DQO o LCFH precisa de uma área 50% maior que a do LCFV. Além desta constatação, verificaram que o LCFV reduz de modo significativo os valores de nitrogênio amoniacal e apresenta altos índices de nitrato no efluente, mostrando seu potencial para a nitrificação. A taxa de aplicação do resíduo foi de 130mm/dia.

Reportando ao Brasil, esse tipo de leito também ainda é pouco conhecido, entretanto, estudos vêm sendo desenvolvidos, especialmente no sentido de se avaliar a potencialidade da combinação dos fluxos, ou seja, leitos de fluxo vertical seguidos de leitos de fluxo horizontal. Destaca-se o sistema híbrido estudado por Sezerino (2006) na Universidade Federal de Santa Catarina, composto de 06 filtros verticais e 01 horizontal plantados com macrófitas como pós-tratamento de efluente de lagoas de estabilização sob condições de clima tropical. O pesquisador destaca que essa combinação resultou em uma eficiência global de remoção de 87% e 80% de DQO e DBO<sub>5</sub>, respectivamente, e 94% para SS. Segundo ele, os verticais foram efetivos na nitrificação do efluente gerado na lagoa anaeróbia, e o horizontal na redução de 61% do nitrogênio nitrato formado, mostrando, assim, a potencialidade desse tipo de sistema.

A associação em série dos leitos cultivados de fluxo vertical e horizontal são conhecidos como sistemas híbridos. O interesse dessa associação é obter uma boa nitrificação nos verticais que são bem oxigenados, mas também, uma denitrificação nos leitos horizontais, onde se encontram condições de anoxia necessária a esta reação.

O presente trabalho se inscreve neste contexto, buscando preencher uma lacuna desse tipo de sistema no âmbito do saneamento no Brasil.

### **3.3.2 – Mecanismos de Depuração das Águas Residuárias nos Leitos Cultivados com Macrófitas**

Conforme afirmado por Philippi e Sezerino (2004), as formas com que as águas residuárias são depuradas e/ou transformadas nos *wetlands* construídos, abrangem uma complexa variedade de processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem, e são promovidos pelos elementos constituintes do meio – solo, microorganismos e plantas. Esta depuração dá-se tanto em

condições aeróbias como em condições anaeróbias, podendo-se, portanto, projetar esses sistemas para finalidades distintas. A Tabela 3.10 resume os mecanismos envolvidos na depuração e transformação dos constituintes dos esgotos.

**Tabela 3.10** – Mecanismos predominantes na remoção de poluentes nos *wetlands* construídos

<b>Constituintes do Esgoto</b>	<b>Mecanismos de Remoção</b>
Sólidos Suspensos	Sedimentação Filtração
Material Orgânico Solúvel	Degradação microbiológica: - aeróbia - anaeróbia
Nitrogênio	Amonificação seguido de Nitrificação e Denitrificação microbiana Retirada pela Planta Adsorção Volatilização da Amônia
Fósforo	Adsorção Retirada pela Planta
Metais	Complexação Precipitação Retirada pela Planta Oxidação/Redução microbiana
Patogênicos	Sedimentação Filtração Predação

Fonte: adaptado de COOPER *et al.*, 1996 *apud* PHILIPPI e SEZERINO, 2004.

Na nitrificação existe uma demanda por um grande suprimento de energia para a aeração, enquanto que na denitrificação há a necessidade de uma fonte de carbono doadora de elétrons. Estes fatores somados resultam na ampliação dos custos em uma estação de tratamento, induzindo ao desenvolvimento de processos que reduzam estes dispêndios.

Assim, nos últimos anos a literatura tem relatado pesquisas sobre processos não convencionais de remoção de nitrogênio.

### **3.3.3 – Distúrbios ambientais provocados pelo Lançamento de esgotos contendo compostos nitrogenados**

O nitrogênio é limitado na água potável para a proteção da saúde infantil e deve ser limitado nas águas de superfície para proteger a vida dos peixes e evitar a eutrofização dos corpos

d'água, sendo um elemento indispensável para o crescimento de algas. Von Sperling (1996b), ressalta que a concentração do nitrogênio total em efluentes municipais está na faixa de 15 a mais de  $50\text{mgL}^{-1}$ , sendo que 60% está na forma de amônia, e o restante na forma orgânica.

Dentre os distúrbios mais agravantes promovidos pelo excesso de N nos corpos d'água, destacam-se a depleção dos níveis de oxigênio dissolvido na massa líquida, a proliferação de macrófitas aquáticas e algas, a toxicidade aos microorganismos e os riscos à saúde pública.

O lançamento de uma grande quantidade de nitrogênio amoniacal ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) presente em efluentes orgânicos em corpos d'água superficial pode desencadear uma oxidação biológica deste composto (nitrificação) reduzindo, assim, os níveis de oxigênio dissolvido no meio. Segundo USEPA (1993), em muitos casos é menos impactante ao ambiente lançar um efluente contendo nitrato ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) em detrimento do nitrogênio amoniacal, pois este já se encontra em estado máximo de oxidação.

A eutrofização, proliferação de macrófitas aquáticas e algas, pode transcorrer na deterioração da qualidade das águas, favorecer a depleção do oxigênio na massa líquida e comprometer os usos múltiplos da água, especialmente com respeito ao uso potável, devido às alterações organolépticas (gosto e odor), e ainda promover a resuspensão de metais como ferro e o manganês em sedimentos sob condições anóxicas (CEPIS, 2000).

A eutrofização pode ocorrer em lagos, rios, estuários e oceanos. Entretanto, tal fenômeno é mais crítico em lagos devido às suas características hidrodinâmicas, onde o aporte de nutrientes via ciclo do N (nitrogênio) e do P (fósforo), e ainda, o lançamento de efluentes orgânicos são mais sensíveis. No ambiente lagunar estes nutrientes ficam em constante reciclo e biodisponíveis para as macrófitas e algas. Nos rios e estuários, o transporte e a dispersão dos nutrientes impedem que os mesmos fiquem disponibilizados na massa líquida por tempo suficiente para que sejam incorporados à biomassa vegetal. Nos mares, a capacidade de diluição torna a eutrofização praticamente imperceptível.

Com respeito à toxicidade aos organismos aquáticos, dentre as formas de nitrogênio, o amoniacal é o grande responsável. A amônia dissolvida na água corresponde às frações de amônia molecular, ou não ionizada ( $\text{NH}_3$ ) e amônia ionizada ( $\text{NH}_4^+$ ), mas, a toxicidade está vinculada, com maior propriedade, à amônia não ionizada. O problema da toxicidade se agrava mais ainda em lagos com baixa concentração de oxigênio.

As formas de N que mais implicam em riscos á saúde são o nitrito – NO<sub>2</sub> e o NO<sub>3</sub>. A principal relação destes ânions com a saúde humana é a potencialidade de promover a metemoglobinemia em crianças (causado por excesso de NO<sub>3</sub>) e a carcinogenicidade relacionada ao NO<sub>2</sub>. (USEPA, 1993).

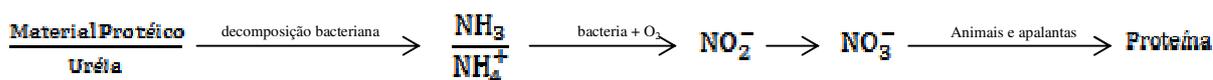
Casos de metemoglobinemia foram relacionados com águas cujas concentrações de nitrato ultrapassavam 10mgN/L (USEPA, 1993). Por isso, a maioria das legislações ambientais e regulamentações para água de consumo humano limitam a concentração deste, em no máximo 10mgN/L.

### 3.3.4 – Transformação da série Nitrogenada

Philippi e Sezerino (2004) ressaltam que o nitrogênio é um elemento chave nos ciclos biogeoquímicos existentes nos leitos cultivados (*wetlands* construídos). As formas encontradas nesses sistemas, segundo os pesquisadores, em sua maioria são oriundas dos lançamentos de esgotos, e variam desde compostos orgânicos – aminoácidos, uréia, ácidos úricos, purinas e pirimidinas, até compostos inorgânicos em diferentes estágios de oxidação – amônia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e/ou NH<sub>3</sub>), Nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), Nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), óxido nítrico (NO), Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O) e, finalmente nitrogênio gás (N<sub>2</sub>).

No meio aquático, segundo Valentim (2000), o nitrogênio pode ser encontrado da seguinte forma:

- Nitrogênio molecular (N<sub>2</sub>) (escapando para a atmosfera)
- Nitrogênio orgânico dissolvido e em suspensão (uréia e matéria protéica)
- Amônia (livre-NH<sub>3</sub> e ionizada NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, esta última, predominante nos LC)
- Íon Nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)
- Íon Nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)



De acordo com Von Sperling (1996b), a ocorrência do nitrogênio como uma destas formas depende de certas condições, apresentadas no Tabela 3.11.

**Tabela 3.11** – Distribuição relativa de nitrogênio segundo distintas condições

<b>Condição</b>	<b>Forma predominante do nitrogênio</b>
Água residuária bruta	- Nitrogênio orgânico; Amônia
Poluição recente em um curso d'água	- Nitrogênio orgânico; Amônia
Estágio intermediário da poluição em curso d'água	- Nitrogênio orgânico; Amônia; Nitrito (em menores concentrações); Nitrato
Poluição remota em um curso d'água	- Nitrato
Efluente de tratamento sem nitrificação	- Amônia
Efluente de tratamento com nitrificação	- Nitrato
Efluente de tratamento com nitrificação/denitrificação	- Concentrações mais reduzidas de todas as formas de nitrogênio

Fonte: VON SPERLING (1996b *apud* VALENTIM, 2000).

O maior mecanismo de remoção de nitrogênio orgânico nos Leitões Cultivados é a seqüência dos processos de amonificação, nitrificação e denitrificação (COOPER *et al.*, 1996; IWA Specialist Group on Use of Macrophytes, 2000; KADLEC e KNIGHT, 1996; PHILIPPI e SEZERINO, 2004). Segundo os pesquisadores o nitrogênio orgânico é mineralizado a amônia através da hidrólise e degradação bacteriana; a amônia é oxidada a nitrato por meio de bactérias nitrificantes em zonas aeróbias; por fim, os nitratos são convertidos a nitrogênio gasoso em ambientes anóxicos e anaeróbios. O oxigênio requerido para a nitrificação é suprido por convecção e difusão atmosférica e pelas plantas. Porém, o nitrogênio também é requerido pelas macrófitas e, portanto, incorporado em sua biomassa. Outros mecanismos como volatilização e a adsorção são verificados, porém, em menor importância quando comparados com a nitrificação/denitrificação.

#### 3.3.4.1 – Amonificação

É um processo no qual o N-orgânico é convertido a N-inorgânico, especialmente a N-amônia pela ação de bactérias hidrolíticas. As taxas de conversão do N-orgânico à amônia são rápidas em zonas aeróbias e decrescem em zonas facultativas e anaeróbias.

Conforme Cooper *et al.* (1996 *apud* Philippi e Sezerino 2004), o nitrogênio orgânico (proteínas e uréia) pode ser convertido a amônio (NH<sub>4</sub>) ou amônia (NH<sub>3</sub>), dependendo da faixa de pH. Em pH próximo da neutralidade, prevalece o surgimento de amônio e dióxido de carbono, bem como íon hidroxila que podem afetar a acidez do meio. Segundo os pesquisadores, a faixa ótima de pH para o processo de amonificação está entre 6,5 e 8,5 .

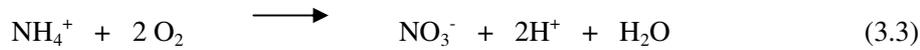
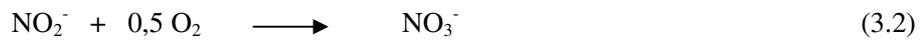
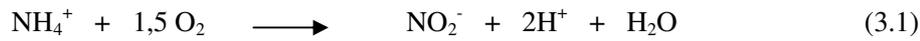
Nos *wetlands* construídos a taxa de amonificação é dependente da temperatura, pH, razão carbono/nitrogênio (C/N) residual e de nutrientes disponíveis no sistema, bem como as condições do solo-textura e estrutura (IWA, 2000; PHILIPPI e SEZERINO, 2004; REDDY e PATRICK, 1984; SEZERINO, 2006).

#### 3.3.4.2 – Nitrificação

Nitrificação é um processo quimioautotrófico, usualmente definida como uma oxidação biológica da amônia a nitrato sob condições aeróbias e mediada, basicamente, por dois gêneros de microorganismos: *Nitrossomonas* e *Nitrobacter*, conforme afirmado por (IWA, 2000; SEZERINO, 2006; WEF, 1994; WPCF, 1983).

Cooper *et al.*, (1996) ressaltam que estes dois gêneros de bactérias nitrificantes utilizam o dióxido de carbono e a alcalinidade do meio como fonte de carbono para a síntese de novas células. IWA (2000) reporta que estes organismos requerem, também, oxigênio – O<sub>2</sub> como acceptor de elétrons durante a conversão da amônia a nitrito e, finalmente, a nitrato.

A nitrificação ocorre em duas etapas: a primeira é a conversão da amônia a nitrito, mediada pelas *Nitrossomonas*; a segunda, o nitrito formado é convertido a nitrato por meio das *Nitrobabacter* (WPCF, 1983). Essas etapas são demonstradas nas equações 3.1 a 3.3.



A taxa de oxidação da amônia – cinética da nitrificação é diretamente proporcional a taxa de crescimento dos organismos nitrificantes (WPCF, 1983). Entretanto, a velocidade desta transformação é influenciada por uma série de parâmetros que, segundo Vimazal (1995 *apud* IWA, 2000), são: pH, alcalinidade, temperatura, fonte de carbono inorgânico, população microbiológica, concentração da amônia e a quantidade de oxigênio dissolvido.

A presença de oxigênio dissolvido é uma condição essencial para a nitrificação. Quanto maior a concentração de amônia a ser oxidada, maior será a necessidade de oxigênio dentro do maciço filtrante. Este oxigênio é carregado para o interior do maciço filtrante via convecção e difusão atmosférica, e também, através das macrófitas.

Parâmetros como pH, temperatura e oxigênio, podem ser modificados a fim de otimizar a nitrificação.

### 3.3.4.3 – Denitrificação

Denitrificação biológica é definida como um processo no qual microorganismos – bactérias quimioheterotróficas reduzem o nitrato a óxido nítrico, óxido nitroso e, finalmente, a nitrogênio gasoso, sob condições anóxicas (onde o oxigênio dissolvido não está presente sendo, então disponibilizado o oxigênio de fontes como nitrato, nitrito, fosfato ou até mesmo sulfato. (COOPER *et al.*,1996; WPCF, 1983).

Inúmeros são os gêneros de bactérias quimioheterotróficas capazes de reduzir o nitrato. Entretanto, *IWA Specialist Group on Use of Macrophytes* (2000), coloca que os gêneros *Bacillus*, *Micrococcus* e *Pseudomonas* são os mais importantes encontrados no solo. Em ambiente aquático, conforme afirmado por (Grant e Long, 1981; *IWA Specialist Group on Use of Macrophytes*, 2000; Philippi e Sezerino, 2004), as mais importantes são as *Pseudomonas*, *Aeromonas* e *Víbrio*.

Cooper *et al.*, (1996), ressaltam que a denitrificação dá-se em duas etapas: a primeira é a conversão do nitrato a nitrito e a segunda, é a redução deste nitrito a óxido nítrico, óxido nitroso e, finalmente, a nitrogênio gasoso. Segundo o pesquisador, os três últimos produtos são gases e escapam para a atmosfera.

A presença de oxigênio dissolvido inibe o sistema enzimático necessário á denitrificação, tornando-se, portanto, um parâmetro crítico a ser controlado. Outros parâmetros como pH e alcalinidade também são importantes no processo. Cooper *et al.* (1996) colocam que a faixa ótima de pH deve estar entre 7.0 e 8.0, entretanto, reporta o pesquisador que, durante a denitrificação há produção de alcalinidade, podendo resultar num aumento do pH.

Segundo Sezerino (2006), o carbono (matéria orgânica) deve estar disponível como fonte de energia para as bactérias denitrificantes. Esta fonte de carbono precisa ser suficiente nos efluentes ou estar contida no biofilme aderido ao material filtrante. O pesquisador resalta que, caso isso não ocorra, fontes sintéticas como metanol, etanol ou ácido acético devem ser fornecidas.

A literatura reporta para a combinação de leitos cultivados de fluxo vertical e horizontal como um sistema eficiente para promover a nitrificação/denitrificação, entretanto, a reutilização de efluente dessa natureza pode demandar riscos para a saúde pública. Hespanhol (2001) resalta que cuidados especiais precisam ser tomados quando ocorre o contato com o público, cuidados estes traduzidos na afirmação feita pelos pesquisadores (Chernicharo, 1989; León & Moscoso, 1986), quando ressaltam a eliminação de microorganismos patogênicos como o principal objetivo do tratamento convencional visando o reúso de esgotos.

A proposta do presente trabalho foi avaliar a capacidade de nitrificação e denitrificação no sistema combinado de Leitos Cultivados, bem como, buscar subsídios com vistas à produção de uma água de reúso para regar gramados e jardins. Nesse contexto, é de grande importância a afirmação feita por Londe (2002), quando avaliou a eficiência de filtro lento no tratamento de efluentes de leitos cultivados. A pesquisadora concluiu que o número de Coliformes Totais e *E. coli* ainda permaneceu acima dos valores esperados. A pesquisadora sugere que o efluente deveria ser utilizado na irrigação ornamental e de culturas que não seriam ingeridas “in natura”. Assim, tal efluente ainda carecia de uma etapa de desinfecção quando o reúso fosse irrestrito.

### 3.3.5 – Desinfecção

Gonçalves *et al.* (2003), ressaltam que do ponto de vista da engenharia sanitária, a desinfecção pode ser entendida como a etapa responsável pela redução das densidades de microorganismos de interesse até os limites estabelecidos pela legislação para os diferentes tipos de usos da água. Para cada um desses usos aplicam-se critérios e padrões de qualidade, em que não apenas as incidências e as concentrações máximas de organismos são consideradas, mas os próprios organismos, grupos e tipos.

É importante ressaltar que no âmbito do saneamento, o reúso de água vem se tornando uma prática extremamente interessante e viável, entretanto, demanda riscos, (MIERZWA, 2002). Nesse contexto, Nardocci (2003) reporta para os riscos associados aos esgotos, particularmente, ao reúso de água, que, preocupam a sociedade por dois motivos principais: a poluição dos recursos hídricos e as limitações das técnicas de tratamento de água que, apesar dos avanços obtidos nos últimos anos, não removem completamente todas as substâncias indesejadas da água.

Conforme afirmado por Crook (1993), a aceitabilidade do reúso da água para qualquer fim específico depende da sua qualidade física, química e microbiológica. Os fatores que afetam a qualidade da água para reúso incluem a qualidade da fonte geradora, o tratamento da água residuária, a confiabilidade no processo de tratamento, o projeto e a operação dos sistemas de distribuição.

A proteção à saúde pública através do controle de doenças relacionadas com microorganismos patogênicos é o principal motivo para a desinfecção de águas residuárias, (WHITE, 1999). Segundo Lazarova *et al.* (1999), embora os processos de tratamento convencionais possam remover cerca de 90 a 99% de alguns microorganismos, sua eficiência pode não ser bastante para alcançar os padrões necessários para a descarga da água residuária, proteção às áreas de banho ou reúso.

WEF (1996) destaca a importância relativa da desinfecção no tratamento de águas residuárias, que pode ser entendida como a última barreira de proteção contra microorganismos patogênicos. A reutilização de efluente na rega de jardins implica num provável contato com o público, assim, o decaimento dos microorganismos patogênicos é um valioso fator de segurança para reduzir os riscos potenciais à saúde pública. Nesse contexto, o presente trabalho contemplou a etapa de desinfecção no sentido de melhorar o grau de tratamento do efluente dos leitos

cultivados, com vistas ao reúso, sem, contudo, estudá-la na abrangência que lhe é devida, mas detendo-se, essencialmente, na busca por subsídios preliminares com vistas ao reúso. Tomou-se como base indicadores como Coliformes Totais e *E. coli*. para que apontassem sugestões para estudos posteriores com a utilização de equipamentos simplificados e de baixo custo, e que se agregassem à simplicidade dos Leitos Cultivados.

Metcalf e Eddy (1991) citam que no campo do tratamento de esgotos sanitários, são três as categorias de organismos de maior importância na transmissão de doenças; as bactérias, os vírus e os protozoários.

Dentre eles, as bactérias são os organismos que se encontram presentes em maior quantidade nos esgotos sanitários, comparativamente a outros organismos. Elas são do reino monera, procariotas (sem núcleo definido), unicelulares, quimio-heterotróficas ou quimio-autotróficas, dependendo da espécie, e se reproduzem por divisão binária simples. Uma fração importante da população de bactérias presente no esgoto sanitário faz parte da microbiota do trato gastrointestinal dos seres humanos (ex: *E. coli*, *Klebsiella* spp., *Enterobacter* spp.). Dentre elas, destaca-se o grupo das bactérias coliformes fecais, recentemente denominadas termotolerantes, selecionadas por suas características como organismo indicador de contaminação de águas de maneira geral. Normalmente, os organismos indicadores não são causadores de doenças, porém estão associados à provável presença de organismos patogênicos de origem fecal na água. Além das bactérias patogênicas, oriundas do trato intestinal de humanos e animais, os esgotos sanitários também contêm bactérias patogênicas que causam doenças gastrointestinais em humanos, como febre tifóide, cólera, diarreia e disenteria (*Salmonella* spp. e *Shigella*). Geralmente são os organismos patogênicos mais sensíveis à ação de desinfetante físicos e químicos. (JORDÃO e PESSOA, 2003).

A desinfecção ocorre através de um ou mais dos seguintes mecanismos:

- a) Destruição da estrutura celular dos microorganismos;
- b) Interferência no metabolismo com inativação de enzimas;
- c) Interferência na bio-síntese e no crescimento celular evitando a síntese de proteínas, ácidos nucléicos e co-enzimas.

Pode haver oxidação ou ruptura da parede celular com conseqüente desintegração das células (a), ou ocorrer a difusão de um grande agente no interior da célula interferindo na sua atividade (b e c).

Atributos para os desinfetantes serem utilizados no tratamento de esgoto:

- a) Destruir em tempo razoável os microorganismos presentes no esgoto, na quantidade em que estes se apresentam;
- b) A sua concentração na água deve ser de fácil determinação, rápida e simples;
- c) Devem ser disponíveis a custo razoável e devem ter condições de facilidade no transporte, armazenamento, manuseio e aplicação;

Outros aspectos relevantes e que interferem no processo de desinfecção são:

- 1) presença de sólidos no efluente, uma vez que estes podem proteger os microorganismos da ação do desinfetante;
- 2) pH do efluente, já que a inativação de microorganismos aumenta com o decréscimo do pH, tanto para residuais de cloro livre como de cloro combinado;
- 3) temperatura, uma vez que seu aumento também leva a taxa de inativação dos organismos.

### **3.3.6 – Fatores que influenciam na desinfecção**

Conforme afirmado por Metcalf e Eddy (1991), a eficiência dos agentes desinfetantes depende de vários fatores, tais com, como Tempo de Contato, Concentração do Agente, Intensidade do Agente Físico, Tipo de Organismos e Características do Meio Líquido. Para a escolha do processo de desinfecção, o conhecimento da influencia desses fatores é de fundamental importância.

#### **3.3.6.1 – Tempo de Contato**

O fator mais importante no processo de desinfecção, segundo Metcalf e Eddy (1991) é o tempo de contato. Em geral observa-se que para uma determinada concentração de desinfetante, quanto maior o tempo de contato maior é a eficiência na redução da concentração de organismos.

Essa observação foi primeiramente formalizada por Chick. Na forma diferencial a Lei de Chick é expressa pela equação 3.4:

$$\frac{dN}{dt} = -k \cdot N_t \quad (3.4)$$

Onde:

$N_t$ : número de organismos no tempo  $t$ ;

$t$ : tempo;

$k$ : constante de reação.

Se  $N_0$  é o número de organismos no instante  $t = 0$ , a equação 3.4 pode ser integrada nas equações 3.5 e 3.6:

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{(-k \cdot t)} \quad (3.5)$$

Ou

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -k t \quad (3.6)$$

De acordo com Metcalf e Eddy (1991) têm-se observado que em alguns casos a taxa de redução de organismos cresce com o tempo e em outros casos ocorre o inverso. Para formular uma relação verdadeira, normalmente utiliza-se a equação 3.7:

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -K t^{(m)} \quad (3.7)$$

Na equação (3.7) “ $m$ ” é uma constante. Quando  $m < 1$ , a taxa de redução dos organismos decresce com o tempo, e quando  $m > 1$  a taxa de redução cresce com o tempo. Na prática, normalmente pode-se observar variações discrepantes em relação ao decaimento exponencial, que estão associadas a diversos fatores, tais como, mudanças na concentração do agente desinfetante no decorrer do tempo, diferenças entre as resistências de diversos organismos

presentes na mesma cultura com idades diferentes e ocorrência de aglomerados de microorganismos ou oclusão pelos sólidos em suspensão. (USEPA, 1999).

### 3.3.6.2 – Concentração e tipo do Agente Químico

Dependendo do tipo de agente químico, tem-se observado, dentro de certos limites, que a eficiência do desinfetante está relacionada com a concentração. O efeito da concentração pode ser observado pela equação 3.8, formulada empiricamente: (METCALF e EDDY, 1991).

$$C^a t_p = \text{constante} \quad (3.8)$$

Onde:

C = concentração do desinfetante;

a = constante;

t<sub>p</sub> = tempo necessário para se atingir uma determinada porcentagem de redução constante.

A constante “a” da equação (3.8) pode ser calculada plotando em papel di-log a concentração versus tempo (t<sub>p</sub>) para o efeito de uma dada porcentagem de inativação. A inclinação da reta corresponde ao valor de -1/a. Geralmente, se a > 1, o tempo de contato é mais importante do que a dosagem; se a = 1, os efeitos (tempo de contato e dosagem) se equivalem. (METCALF e EDDY, 1991).

### 3.3.6.3 – Número de Organismos

Um grande número de patógenos entéricos, incluindo vírus, bactérias e parasitas estão presentes no esgoto doméstico, existindo, portanto, dificuldades na identificação e caracterização. Entretanto, conforme afirmado por Metcalf e Eddy (1991), em sistemas diluídos como esgotos, a concentração de organismos nem sempre é a principal consideração. Entretanto, Pires (1997) concluiu que a partir da equação (3.5) quanto maior a concentração de organismos, maior é o tempo necessário para dada inativação. A relação empírica que descreve o efeito da concentração de organismos, segundo Metcalf e Eddy (1991) é descrita na equação 3.9:

$$C^a N_p = \text{constante} \quad (3.9)$$

Onde:

C = concentração de desinfetante;

Np = concentração de organismos reduzidos para uma dada porcentagem em um dado tempo;

q = constante relacionada com o poder do desinfetante.

### 3.3.7 – Processo de desinfecção

A desinfecção de esgotos é em geral a prática mais segura e de menor custo para implantação de efetiva barreira de controle de agentes transmissores de doenças infecciosas quando da probabilidade de contato humano com esgotos sanitários. (USEPA, 1979 *apud* OLIVEIRA, 2005).

Conforme afirmado por Gonçalves *et al.* (2003), desinfetar esgotos é uma prática que busca inativar ou reduzir seletivamente espécies de organismos presentes no esgoto sanitário, em especial aquelas que ameaçam a saúde humana, em consonância com os padrões de qualidade estabelecidos para diferentes situações. A desinfecção pode ser realizada por meio de processos artificiais ou naturais, utilizando isoladamente ou de forma combinada, agentes físicos e químicos.

Os processos de desinfecção, segundo Lapolli *et al.*, (2003), independentemente do desinfetante empregado, são efetivos apenas em efluentes de alta qualidade, fato que, muitas vezes demanda tratamento tão avançado quanto o terciário. Segundo os pesquisadores, devido à interferência de substâncias presentes no esgoto, tentativas de desinfecção de esgoto bruto proveniente de coletores simples ou combinado representam desperdício de produtos químicos, tempo e energia.

Aisse *et al.*, (2003), colocam que as muitas variáveis físicas, químicas e biológicas em um processo de desinfecção determinam a existência de um conjunto de valores de tempo de contato e concentração do desinfetante que garantem a desinfecção nos limites da segurança sanitária requerida.

Conforme afirmado por Lapolli *et al.*,(2003), a destruição ou a inativação dos microorganismos na desinfecção de efluentes domésticos pode ser parcial, de acordo com o uso pretendido para o mesmo. Segundo os pesquisadores, do ponto de vista da saúde, o processo de desinfecção é o estágio mais importante do tratamento de esgoto. Entretanto, os pesquisadores ressaltam que os processos de desinfecção não são equivalentes, sendo, portanto, necessário escolher aqueles mais apropriados. Na prática, não há desinfetante ideal e que atenda a todos os requisitos independentemente da situação de uso. Cada agente desinfetante apresenta vantagens e desvantagens em função de condições específicas de sua utilização, e depende, para otimização de seus resultados, tanto da qualidade da água a ser desinfetada (características físicas, químicas, e grau de contaminação microbiológica), como das condições de projeto, operação e manutenção das unidades. Dessa forma, a seleção da tecnologia de desinfecção apropriada a cada realidade deve levar em conta esses aspectos, e outros fatores que influenciam na confiabilidade, continuidade e eficiência do sistema.

Aisse *et al.*, (2003), ressaltam a importância de se conhecer a taxa de inativação do microorganismo indicador pelo agente desinfetante quando se pretende projetar um sistema de desinfecção. Segundo os pesquisadores, a determinação do desinfetante e o projeto das instalações de desinfecção dependem das metas a serem atingidas, em função das diretrizes estabelecidas pela legislação ambiental.

### **3.3.7.1 - Cloração**

Segundo Aisse *et al.*, (2003), o cloro é o produto mais utilizado em todo o mundo para desinfecção de águas e esgotos. No caso do Brasil, a cloração é o método de maior domínio tecnológico e viabilidade econômica atualmente. Para a desinfecção de águas residuárias, o cloro pode ser encontrado comercialmente nas formas: gasosa ( $\text{Cl}_2$ ), líquida, hipoclorito de sódio ( $\text{NaOCl}$ ) e sólida, hipoclorito de cálcio [ $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ ]. Também, pode ser produzido no local apartir de salmoura ou reação controlada de produtos químicos.

#### **3.3.7.1.1 – Reações do Cloro em Meio Aquoso**

Segundo Metcalf e Eddy (1991) quando o cloro é adicionado na água na forma de gás  $\text{Cl}_2$ , duas reações ocorrem: A hidrólise (equação 3.10) e a ionização (equação 3,11).

A hidrólise pode ser definida pela equação 3.10:



A constante de hidrólise para essa equação é:

$$k_H = \frac{[\text{H}^+][\text{Cl}^-][\text{HOCl}]}{[\text{Cl}_2]} = 4,5 \times 10^{-4} \quad \text{na temperatura de } 25^\circ\text{C}$$

Por se tratar de uma reação de equilíbrio, a concentração do cloro no meio líquido depende do pH. De acordo com a equação (3.10), para faixas de  $\text{pH} < 4$ , o equilíbrio é deslocado para a direita acarretando a não dissociação total do cloro.

- A ionização pode ser descrita pela equação 3.11:

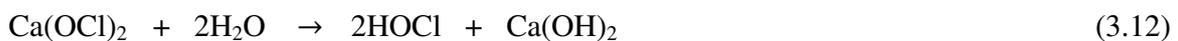


A constante cinética dessa reação é:

$$k_i = \frac{[\text{H}^+][\text{Cl}^-]}{[\text{HOCl}]} = 2,9 \times 10^{-8} \quad \text{na temperatura de } 25^\circ\text{C}$$

A quantidade de HOCl e OCl<sup>-</sup> que estão presentes na água é chamado de “cloro livre”. O equilíbrio da reação (3.11) é função do meio. Torna-se necessário, portanto, o efetivo controle da reação uma vez que se deve privilegiar a formação de HOCl, pois seu poder de oxidação é cerca de 40 a 80 vezes maior que o poder de oxidação do OCl<sup>-</sup>.

Segundo Metcalf e Eddy (1991), o cloro também pode ser obtido quando adicionamos sais de hipoclorito na água. As reações são as seguintes, descritas nas equações 3.12 e 3.13:



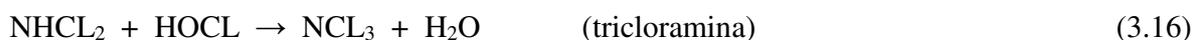
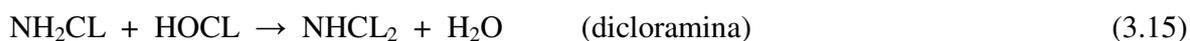
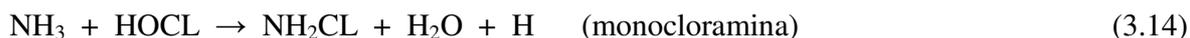
Conforme afirmado por Aisse *et al.*, (2003), o hipoclorito de sódio (NaOCL) é o produto mais adequado para cloração em sistemas simples e de pequeno porte, em virtude da facilidade de aplicação em pequenas vazões operacionais, do baixo risco de manuseio e armazenamento e do baixo custo. Razão que conduziu à escolha do cloro nessa forma para a desinfecção do efluente dos leitos cultivados.

Nas aplicações práticas de desinfecção de esgotos utilizando o cloro nas formas de hipoclorito de sódio e hipoclorito de cálcio, a quantidade relativa de cloro presente nessas fontes alternativas de cloro é expressa em termos de “cloro disponível”. Estequiometricamente, compostos puros de hipoclorito de sódio e de cálcio contém 95,2% e 99,2% de cloro disponível, respectivamente. (AISSE *et al.*, 2003; USEPA, 1986).

#### 3.3.7.1.2 – Reações do Cloro com Esgoto

Aisse (2003) ressalta que uma vez em contato com as bactérias presentes no esgoto sanitário, o cloro induz uma série de eventos associados à atividade da membrana celular, como alteração da permeabilidade, e modifica os ácidos nucléicos, causando mutações. Segundo WEF (1996), das reações que ocorrem com os compostos orgânicos deve-se dar atenção àquelas que ocorrem com o nitrogênio orgânico e com os compostos não nitrogenados que podem formar trihalometanos (THMs). A aplicação do cloro e de seus compostos na presença de nitrogênio amoniacal desencadeia reações de formação das cloraminas, com menor eficiência que o cloro livre no processo de desinfecção (AISSE *et al.*, 2003; USEPA, 1986). Isso gera a necessidade de utilização de maiores tempos de contato e/ou dosagens do desinfetante.

Chernicharo *et al.*(2001) citam que o ácido hipocloroso é um forte oxidante, e quando em contato com a amônia presente nos esgotos causará reações, resultando em três compostos, denominados cloraminas (equações 3.14, 3.15, 3,16):



Chernicharo *et al.*, (2001), destacam que, cada um desses três compostos; monocloramina ( $\text{NH}_2\text{Cl}$ ), dicloramina ( $\text{NHCl}_2$ ) e tricloramina ( $\text{NCl}_3$ ), contribui para o residual de *cloro combinado*. Essas reações químicas, segundo os pesquisadores, proporcionam o fenômeno do *breakpoint*, quando águas contendo amônia são cloradas. Em águas contendo nitrogênio orgânico amoniacal, o *breakpoint* ocorre, mas é menos definido.

Essas reações dependem do pH, temperatura, tempo de contato e concentração relativa entre cloro e amônia (Metcalf e Eddy, 1991). As monocloraminas e as dicloraminas na maioria dos casos predominam. Esses compostos são chamados de *cloro disponível combinado*. As cloraminas são também usadas como desinfetantes, apesar de atuarem mais lentamente.

A eficiência do cloro como desinfetante pode ser verificada pela relação entre o residual bactericida “R” e o tempo de contato “t”. Variando estes dois parâmetros (R e t), separadamente ou simultaneamente, é possível se atingido o mesmo grau de desinfecção. De forma simplificada, tem-se que, quanto maior o tempo de contato para dosagem fixa de cloro, maior será a eficiência da desinfecção, ou para um tempo de contato fixo, maior a eficiência quanto maior a dosagem. (DI BERNARDO, 1993 *apud* PIRES, 1997)

Segundo Pires (1997), a expressão que relaciona a dosagem de cloro (concentração do desinfetante) com o tempo de contato para um determinado tipo de microorganismo, é a mesma apresentada na equação (3.8). Reescrevendo esta equação para o desinfetante cloro, tem-se (equação 3.18):

$$(D_{Cl})^{\beta} \cdot t = k_{Cl} \quad (3.18)$$

### 3.3.1.3.3 - Formação de Subprodutos da Desinfecção com Cloro

O uso de cloro como desinfetante tem sido questionado pelo potencial de formação de subprodutos indesejáveis. O cloro reage com a matéria orgânica dissolvida presente nos esgotos e forma compostos halogenados como trihalometanos e os ácidos haloacéticos. Os compostos halogenados são causadores de efeitos adversos à saúde humana.

Pesquisadores destacam que uma variedade de compostos orgânicos reagem com o ácido hipocloroso formando clorofórmio. Jolley *et al* (1990), verificaram que mais de 1% da dosagem de cloro pode ser convertida em compostos organoclorados durante a desinfecção de efluentes

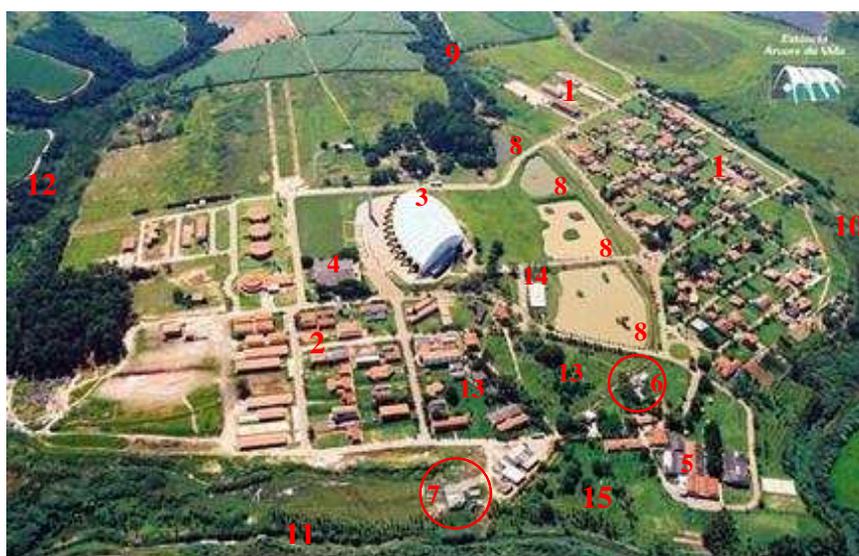
onde o residual de cloro seja da ordem de  $12\text{mgL}^{-1}$ . Entretanto, a cinética desse processo foi suficientemente baixa, de forma que a formação de organoclorados ocorreu 4h após a desinfecção.

Conforme afirmado por Rebhun *et al.* (1997 *apud* Oliveira, 2005) durante a cloração, as maiores frações são os trihalometanos e os ácidos haloacéticos. Entretanto, segundo os pesquisadores, na cloração de efluentes que contém nitrogênio amoniacal (efluentes não nitrificados), a formação de THMs é insignificante, ao passo que em efluentes nitrificados, a quantidade de THMs formados é maior. Assim, em complemento ao processo de cloração, Oliveira (2005) ressalta que a inclusão de processo de descloração pode ser necessária, visando minimizar os efeitos tóxicos dos compostos clorados, nitrogenados, e outros compostos orgânicos e inorgânicos.

## 4 – MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 – Descrição do Local do Experimento

O local utilizado para a realização da pesquisa foi a área de eventos Estância Árvore da Vida (EAV), localizada na zona rural do município de Sumaré/SP, visão panorâmica apresentada na Figura 5. A área possui a seguinte posição geográfica: Latitude - S 22° 51' 35", Longitude – W 47° 20' 29" e Altitude em relação ao mar 571,4m.



**Figura 5.** Área de Eventos Estância Árvore da Vida – visão panorâmica

(1)Recanto: residências e apartamentos, (2)Alojamentos, (3)Auditório, (4)Centro de Convivência, (5)Cozinha/Restaurante, (6)ETA, (7)ETE, (8)Lagos, (9)Minas d'água, (10)Córrego Paraíso, (11)Ribeirão dos Toledos, (12)Córrego, (13)Camping, (14)Administração, (15)Área/laser .

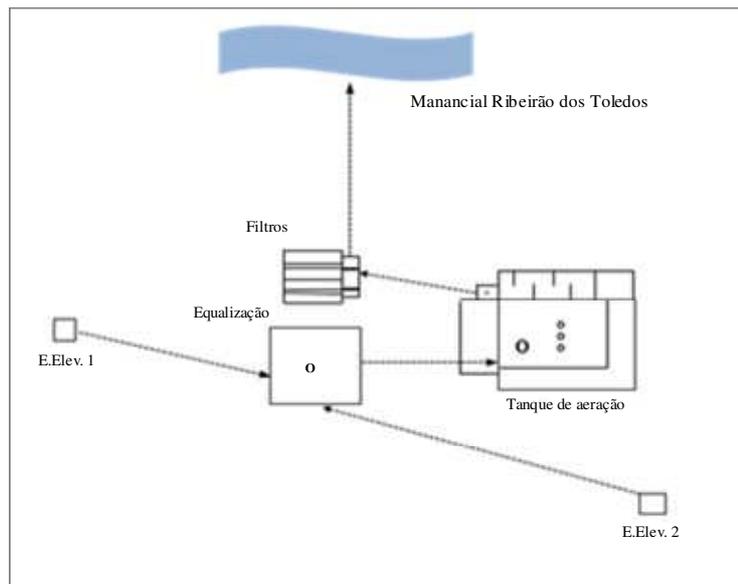
A EAV tem as características físicas de uma cidade, pois possui infra-estrutura própria de coleta de lixo, coleta e tratamento de água e esgoto, rede de drenagem para águas pluviais e rede elétrica. A EAV é composta de dois blocos de edificações: 1) o primeiro bloco é composto de um recanto, formado de casas residenciais e quatro prédios de apartamentos; um restaurante com uma cozinha industrial associada; um bloco administrativo; 2) o segundo bloco é composto de vários prédios de alojamentos com dimensões diferenciadas; um auditório para 10.000 pessoas; um centro de convivência. A área é circundada por rios e córregos, e é dotada de 04 lagos em seu interior. Esses mananciais, conforme apresenta a Figura 5, circundam a área, perfazendo um

percurso dando a formação de um “U”. O abastecimento de água da EAV ocorre através dos 03 lagos existentes no seu interior, os quais são supridos por fontes naturais e pela água de chuva captada e escoada através do telhado do seu auditório principal. Esse auditório, com capacidade para 10.000 pessoas, torna-se um grande supridor desses lagos em períodos de chuvas, o que tem sido de grande benefício, especialmente durante os grandes eventos.

A EAV é destinada à realização de pequenos médios e grandes eventos, nacionais e internacionais. A freqüência populacional na área flutua entre 500 a 10.000 pessoas conforme a variação dos eventos. A população fixa, de 500 pessoas, compreende as famílias residentes e os funcionários da EAV. A área residencial é pouco utilizada, permanece com a população fixa praticamente ao longo de todo o ano, sendo utilizada somente em quatro eventos fixos que ocorrem ao longo do ano. Essas residências são utilizadas pelos proprietários que vão à Estância para participarem com suas famílias desses quatro eventos. Já a área de alojamento é disponibilizada para hospedagem dos integrantes de todos os eventos. Sua utilização é variável, conforme a população presente nesses eventos. Os eventos fixos ocorrem nos meses de janeiro, fevereiro, julho e setembro. A população flutuante pode, portanto, ser descrita da seguinte maneira: a) 9000 pessoas, aproximadamente, durante 09 (nove) dias dos meses de fevereiro e setembro, respectivamente; b) 2.000 pessoas, aproximadamente, durante 09 (nove) dias dos meses de janeiro e julho, respectivamente; c) A população dos demais eventos é variada, podendo chegar a 10.000 pessoas.

#### **4.2 – Estação de Tratamento de Esgoto existente na EAV**

A ETE em funcionamento na área consiste de um tanque de equalização, um reator em batelada do tipo lodo ativado com aeração prolongada e dois Filtros conforme mostra a Figura 6.



**Figura 6.** Fluxograma da ETE em funcionamento e a disposição final do efluente

A estação foi projetada para atender a uma população máxima de 10.000 pessoas com uma vazão de projeto de  $9,26\text{Ls}^{-1}$  e compreende:

**a) Tanque de Equalização** - Tem formato quadrado ( $8,40\text{m} \times 8,40\text{m} \times 3,0\text{m}$ ) e volume útil de  $176,40\text{m}^3$ . Nesse tanque ocorre a recepção de todo o esgoto gerado na área. Devido à grande variação na contribuição de esgoto na área (flutuação populacional dos eventos), essa unidade garante uma contribuição mínima de carga para o desenvolvimento da população microbiana no tanque reator (lodo ativado). Esse tanque é provido de agitação mecânica através de 01 aerador flutuante, cuja função é manter os sólidos em suspensão, evitando sua deposição no fundo do tanque, bem como, a produção de odores.

Este tanque também tem a função de uma elevatória. Nele estão instalados dois conjuntos moto-bomba, um como reserva do outro, os quais promovem o recalque de alimentação do tanque reator.

**b) Tanque de Aeração** - onde ocorre o tratamento biológico. Esse tanque tem formato quadrado ( $11,7\text{m} \times 11,7\text{m} \times 3,5\text{m}$ ) e volume útil do tanque  $410,67\text{m}^3$ . O tanque, inicialmente era dotado de 03 aeradores com potência de 20cv, cada, e operado conforme a ocupação da área. Entretanto, durante a pesquisa, somente um aerador estava em funcionamento, fato que nos levou a introduzir uma etapa preliminar (descrita posteriormente) antes dos leitos para reter sólidos. As

bateladas funcionavam em ciclos e as quantidades dependiam da variação populacional dos eventos.

Depois de concluída uma batelada, o efluente era encaminhado para os filtros, e após essa etapa era lançado no manancial Ribeirão dos Toledo (classe 03- Bacia do Rio Piracicaba, a jusante da captação de água de abastecimento para Santa Bárbara D'Oeste) (CBH-PCJ, 2002).

O efluente utilizado na pesquisa com vistas ao reúso foi captado no tanque chicanado conjugado ao tanque de aeração (lodo ativado), antes dos filtros, por isso, apenas se menciona a etapa referente aos filtros, sem, contudo, descrevê-la.

#### **4.2.1 - Características do Esgoto da EAV**

A geração de esgoto na área vem de dois blocos geradores, conforme já descrito, bloco 1 e bloco 2. O esgoto dos blocos 1 e 2 tinha direcionamento para as Estações Elevatórias 1 e 2, respectivamente, e na sequência seguia para Estação de Tratamento.

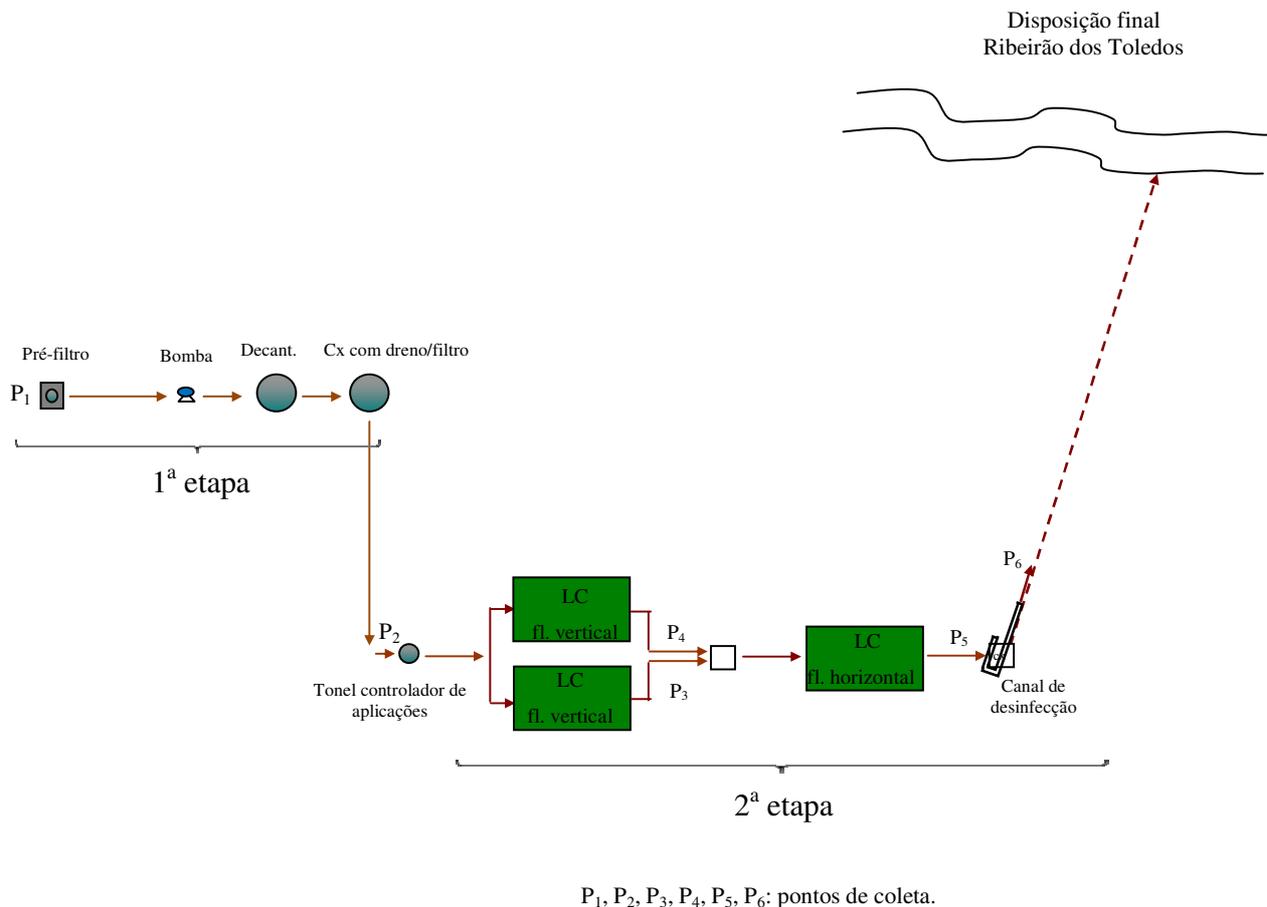
O esgoto da EAV é tipicamente doméstico e a ETE em funcionamento não recebe contribuição de esgoto de qualquer outra área. Ressalta-se, entretanto, uma diferenciação na dinâmica dos quatro eventos fixos e dos demais eventos que ocorrem na área. Esse fato aponta para prováveis alterações no esgoto da área. Os eventos fixos são associados à Estância, portanto, toda a estrutura da área fica disponibilizada para os participantes. Alguns alojamentos possuem cozinhas equipadas, porém não industrial, que durante esses eventos são utilizadas, sendo, portanto, parte das refeições preparadas nos próprios alojamentos. Diferentemente dos quatro eventos fixos, nos demais, todas as refeições são realizadas no restaurante da EAV, sendo utilizada, portanto, somente a cozinha industrial da área. Essa dinâmica diferenciada aumentava o volume de esgoto nos eventos fixos, e aponta também para uma alteração de suas características devido ao acréscimo de maiores quantidades de produtos químicos em consequência das lavagens das cozinhas. A Tabela 4.1 apresenta os resultados da caracterização do esgoto da EAV em dois momentos distintos.

**Tabela 4. 1.** Resultados da caracterização do esgoto da Estância Árvore da Vida em dois momentos distintos

	Data	População	DBO mg.L <sup>-1</sup>	DQO mg.L <sup>-1</sup>	pH	ST mg.L <sup>-1</sup>	SST mg.L <sup>-1</sup>	NH <sub>3</sub> mg.L <sup>-1</sup>	P mg.L <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> mg.L <sup>-1</sup>	Turb FAU	CT NMP/100ml	CF NMP/100ml
Esgoto bruto (tanq.equaliz)	21/06/06	100pes	196	374	6,18	1565	90	32,5	5,4	10,2	140	>2,4x10 <sup>6</sup>	>2,4x10 <sup>6</sup>
Afluente ao tanque/ aeração	13/07/06	600pes	-	720	6,57	905	305	46,5	7,6	17,5	406	>2,4x10 <sup>6</sup>	>2,4x10 <sup>6</sup>
Efluente ao tanque/aeração	13/07/06	600pes	-	151	6,28	560	220	10	8,8	2,6	110	>2,4x10 <sup>6</sup>	7,8x10 <sup>4</sup>

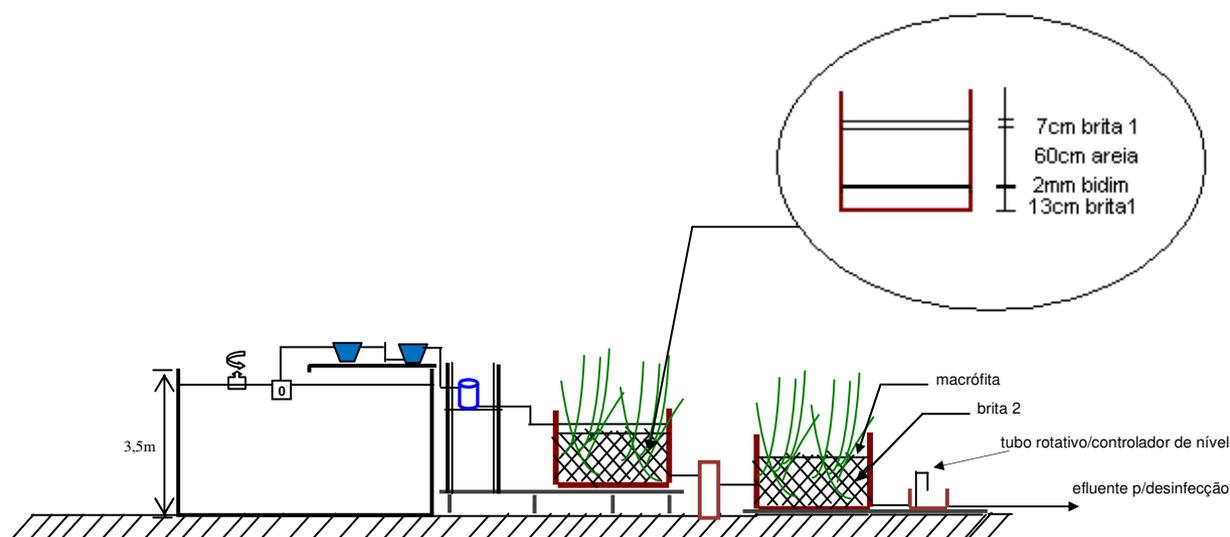
### 4.3 - Sistema Experimental - projeto

O Sistema Experimental compreende duas etapas, conforme apresenta o fluxograma da Figura 7, que podem ser assim descritas:



**Figura 7.** Fluxograma do Sistema Experimental

A Figura 8 apresenta o corte longitudinal do tanque de aeração da ETE em funcionamento e do sistema experimental.



**Figura 8.** Corte Longitudinal: Tanque de Aeração da ETE da EAV, Sistema Experimental (sem escala)

*1ª etapa* – Essa etapa preliminar não era parte integrante do projeto original, entretanto foi desenvolvida apenas com o objetivo de melhorar o efluente que seria recebido pelos LCs. Isso se deve às turbulências sofridas pela ETE da EAV no período da pesquisa, provocadas por problemas mecânicos nos aeradores. Essa etapa foi instalada e desenvolvida na laje superior da ETE em funcionamento na área de pesquisa, conforme mostram as Figuras 8 e 9, e compreende: 01 pré-filtro de brita 2 com dimensões 0,50m x 0,50m x 0,50m, de onde era bombeado o efluente para uma caixa de 310L que funcionou como um decantador. O efluente advindo dessa caixa passava para uma segunda caixa com volume de 310L, cujo nível era controlado por uma bóia, dentro da qual foi colocado um dreno/filtro (Figura 11), de onde o efluente seguia para um tonel de 100L onde se controlava as aplicações afluentes aos LCFVs (Figura 13-A). Essa etapa foi inserida com vistas, essencialmente, à retenção de sólidos para prevenir a colmatção dos LCFVs.

2ª etapa – Essa etapa da pesquisa corresponde ao foco principal do presente estudo. Foi implantada ao lado da ETE da EAV, e conforme mostra o fluxograma da Figura 7, é constituída de 03 etapas: 02 Leitões Cultivados com Macrófita de Fluxo Vertical, 01 Leito Cultivado com Macrófita de Fluxo Horizontal e 01 Canal de Cloração. O sistema foi suprido com o efluente secundário proveniente do tratamento biológico da ETE em funcionamento (lodo ativado) após passar pela etapa preliminar. As aplicações no sistema foram efetuadas e controladas através de um tonel com volume de 100L (Figura14). O efluente supria os LCFVs e na seqüência o LCFH. Apartir do LCFH o efluente seguia para um Canal de Cloração.

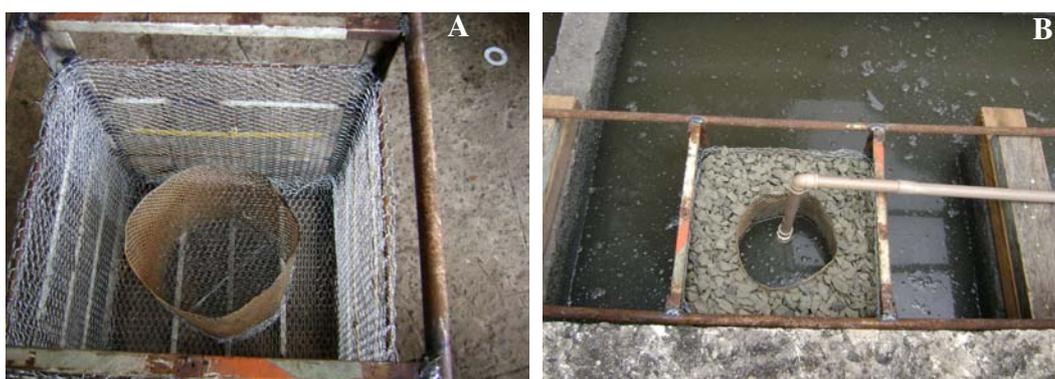
Nesse trabalho, a etapa de desinfecção entrou com a conotação apenas de se investigar um dispositivo de baixo custo que se agregasse à simplicidade dos leitões cultivados, onde fosse possível o controle das aplicações do desinfetante, sem, contudo, demandar o uso da energia elétrica. Assim, as amostragens para essa etapa ocorreram somente após três meses do início das etapas anteriores com o objetivo de buscar subsídios preliminares que apontassem o equipamento utilizado como proposta para estudos posteriores.

## 4.4 - Projeto e Construção do Sistema Experimental

### 4.4.1 – Etapa Preliminar



**Figura 9.** Foto demonstrativa da 1ª Etapa do Sistema Experimental: (1) pré-filtro de brita 2 como ponto de captação do efluente e suporte de fibra de vidro para proteção em relação às subidas de nível no tanque de captação; (2) decantador; (3) caixa de passagem contendo filtro/dreno.



**Figura 10.** Pré-filtro de brita 02: (A) cesto de tela para montagem do pré-filtro, dimensões 0,50m x 0,50m x 0,50m, (B) pré-filtro de brita 2 instalado como ponto de captação para o bombeamento do efluente para o decantador.



**Figura 11.** (A) interligação do decantador com a caixa de passagem contentora de filtro/dreno, (B) e (C) detalhe das tubulações de entrada e de saída das caixas e disposição do dreno na caixa, (D) e (E) detalhe do dispositivo para reter sólidos na passagem do efluente dentro da segunda caixa.

O pré-filtro foi confeccionado na própria serralheria da EAV. É constituído de 02 cestos, sendo o maior com dimensões 0,50m x 0,50m x 0,50m, confeccionado em ferro e tela, e o menor, de alumínio com diâmetro 0,25m e profundidade 0,33m. Colocou-se o cesto menor dentro do maior e o espaço entre eles foi preenchido com brita 2 (Figura 10). Esse filtro, conforme mostram as Figuras 9 e 10-B, foi colocado dentro de um tanque que recebe o sobrenadante do tanque de aeração após a decantação. Esse tanque é chicanado e conjugado ao tanque de aeração. O filtro teve como suporte de sustentação duas chicanas desse tanque. O cesto menor serviu como ponto de captação para o bombeamento do efluente para o decantador. Foi anexado ao suporte de ferro do cesto em tela, um quadrado de placas de fibra de vidro, que serviu de proteção para evitar o afogamento do pré-filtro quando das subidas de nível da água do tanque chicanado.

Utilizou-se 02 caixas de polietileno com volume de 310L (cada); uma funcionou como decantador do efluente e a outra para conter um filtro/dreno e ao mesmo tempo dar passagem ao efluente para os LCs. Essas caixas foram instaladas, conforme apresenta a Figura 11-A, sobre a laje da ETE da EAV. A tubulação que as interliga é de PVC DN 25. O dreno utilizado dentro da caixa teve, basicamente, a função de reter sólidos, e foi uma aquisição de um depósito de material reciclável existente na EAV. Esse dreno conforme mostra a Figura 11, é constituído de 08 (oito) peças e um círculo central que as prende. O efluente passa através das pequenas fendas contidas nas peças e segue para suprir os LCs, ficando os sólidos maiores retidos na parte externa do dreno.

#### **4.4.2 – Leitos Cultivados com Macrófitas**

##### **4.4.2.1 – Construção dos Leitos**

Os Leitos foram montados em níveis diferentes, conforme mostra a Figura 12. Os de fluxo vertical foram assentados sobre 02 lastros de concreto dispostos paralelamente sobre quatro muretas construídas com bloco de cimento para permitir a descida do esgoto por gravidade de forma adequada para entrada do efluente no leito de fluxo horizontal. Devido ao aproveitamento do desnível do terreno, as muretas tiveram altura variável, sendo a maior com 0,80m e a menor com 0,40m de altura. O leito de fluxo horizontal foi assentado sobre outro lastro de concreto disposto sobre o próprio solo. Para facilitar o acesso aos leitos, especialmente, durante o monitoramento e manuseio das plantas, construiu-se uma passarela de madeira em volta dos

leitos, que serviu também como travamento das caixas, prevenindo-se os esforços nas paredes provocadas pelo maciço filtrante e pela movimentação da água.



**Figura 12.** Disposição dos leitos cultivados com macrófitas. (A) e (B) leitos de fluxo vertical com a tubulação de distribuição não suspensa, (C) leito de fluxo horizontal, (D) detalhe ressaltando o desnível dos LCFVs em relação ao LCFH.

Os dispositivos de entrada e saída dos leitos, bem como, o tonel de controle das aplicações estão apresentados na Figura 13. Nesse tonel foram controladas e efetuadas as aplicações afluentes diárias nos leitos de fluxo vertical de forma intermitente (Figura 13-A e B). A tubulação que saía do tonel foi interligada à tubulação de distribuição do efluente dos LCFVs através de mangueiras (Figura 13-B), para favorecer a flexibilidade nos movimentos (suspender e descer) da tubulação quando das etapas de podas das macrófitas.

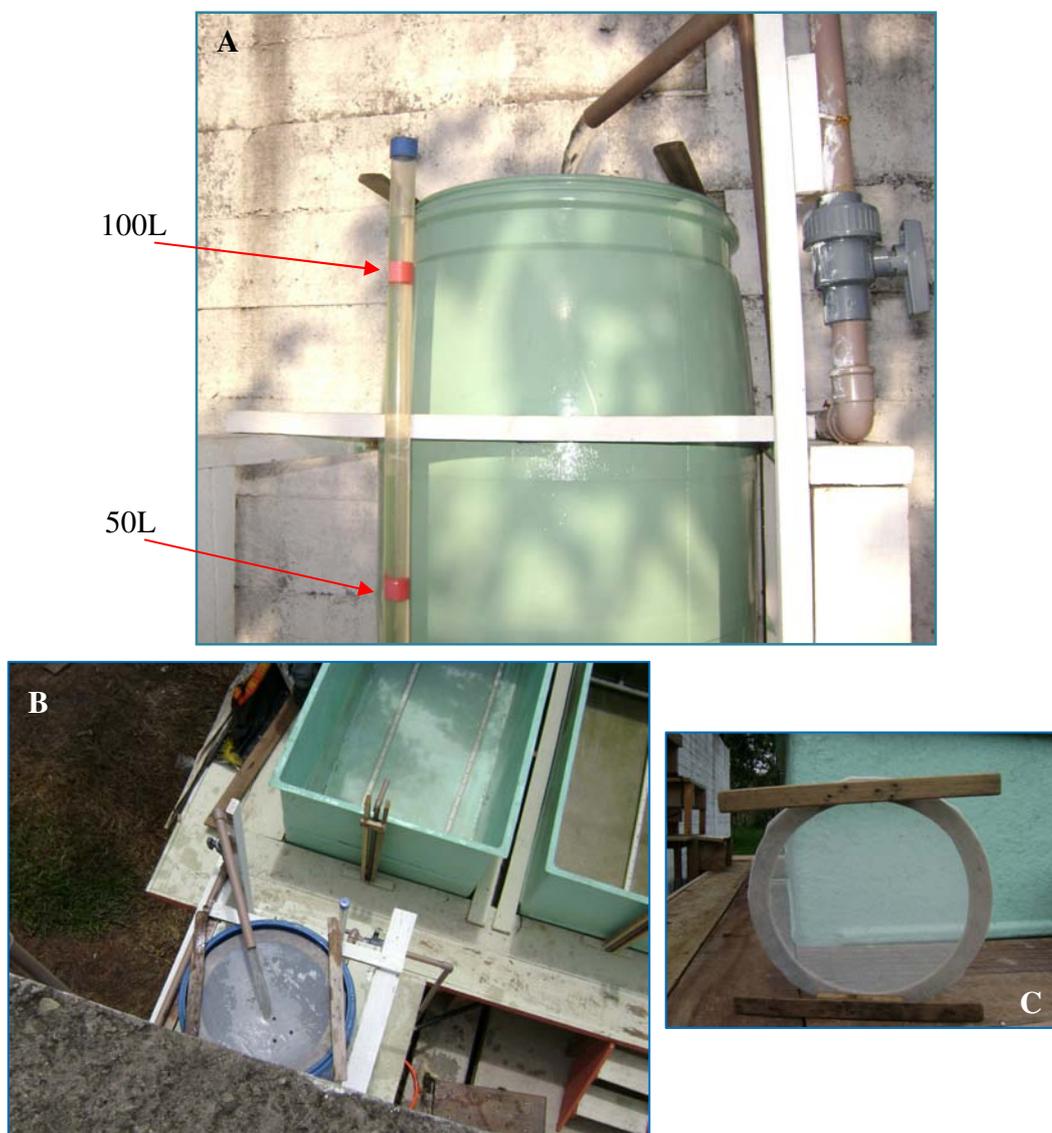
Optou-se por dispositivos de saída de cada leito vertical individual, para maior precisão e facilidade nas coletas (Figura 13-C). Após passar por uma caixa de passagem (Figura 13-D), o efluente segue para o leito de fluxo horizontal. Para o controle do nível d'água dentro do leito de fluxo horizontal foi conectado à tubulação de saída um tubo rotativo que era mantido na posição vertical a uma altura de 0,65m. Esse era o nível máximo mantido dentro do leito horizontal, podendo ser rebaixado, conforme a inclinação do tubo. A saída da água na parte superior do tubo era direcionada no sentido descendente através de um contorno resultante da adaptação de dois

cotovelos de 90° (Figura 13-F). Na seqüência, o efluente passa por um canal onde ocorre a desinfecção através da cloração (esse canal será mostrado em figuras posteriores).



**Figura 13.** Dispositivos para controle e suprimento, entrada e saída de efluente nos leitos: (A) Tonel controlador das aplicações afluentes nos leitos, (B) Tubulação conectada a mangueiras para o suprimento e distribuição na entrada dos leitos de fluxo vertical, (C) e (D) Saídas individuais e caixa de passagem para o efluente advindo dos leitos de fluxo vertical, (E) e (F) Tubo controlador de nível e de saída do efluente do leito de fluxo horizontal.

A Figura 14 apresenta o tonel e detalhes de proteção. Ele foi provido de um tubo graduado com duas alturas, que correspondiam a 50L e 100L, para controle do volume de esgoto nas aplicações dos leitos



**Figura 14.** (A) Tonel controlador das aplicações afluentes nos leitos, (B e C) Peneira para proteção em relação a folhas, insetos e outros sólidos que viessem a cair no tonel.

A peneira (Figura 14-C) foi um artifício utilizado por causa das quantidades de folhas e insetos que normalmente caíam dentro do tonel. Ela teve a função de prevenção de arraste desses

sólidos e outros, que pudesse provocar entupimento nos furos da tubulação de distribuição do efluente nos LCFVs.

#### 4.4.2.1.1 – Montagem dos Leitos de Fluxo Vertical

Foram utilizados dois tanques de fibra de vidro (Figura 15-A e B) com formato retangular, com área superficial  $2,75\text{m}^2$  e volume de  $3,30\text{m}^3$  (cada), cujas dimensões são  $2,50\text{m} \times 1,10\text{m} \times 1,20\text{m}$ . Os tanques foram preenchidos com  $0,80\text{m}$  de material filtrante, distribuído da seguinte forma: camada de topo –  $0,07\text{m}$  de brita 1; camada intermediária –  $0,60\text{m}$  de areia média; manta de bidim –  $2\text{mm}$ ; camada de fundo –  $0,13\text{m}$  de brita 1.



**Figura 15.** Disposição dos leitos e a montagem do maciço filtrante. (A) tubulação de coleta do efluente no leito vertical, (B) manta de bidim sobre a camada de fundo de brita 1, (C) leito de fluxo horizontal preenchido com brita 2.

A areia utilizada como material filtrante nos LCFVs possui as seguintes características, obtidas a partir da curva granulométrica (Figura 16).

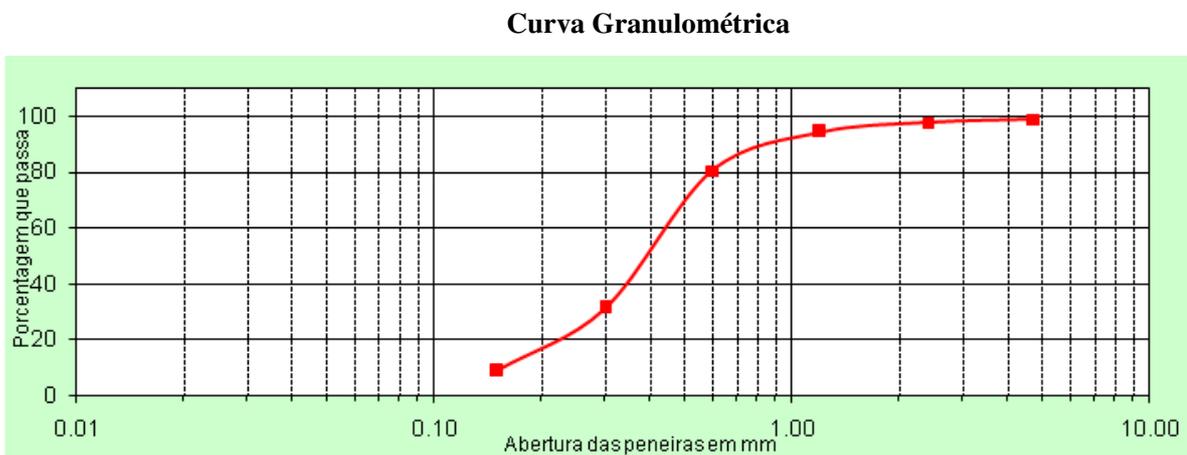
O diâmetro efetivo, ou ainda  $d_{10}$ , é definido como diâmetro correspondente a 10% em peso total das partículas menores que ele, (ABNT, 1997; CAPUTO, 1996). Através da obtenção deste índice, a partir da curva granulométrica (Figura 16), pode-se prever o coeficiente de (U).

Segundo Caputo (1996), com base no diâmetro efetivo e no diâmetro correspondente a 60% em peso total de todas as partículas menores que este valor ( $d_{60}$ ), obtido segundo o ensaio granulométrico, pode-se determinar o coeficiente de uniformidade pela relação descrita na equação 4.1:

$$U = d_{60}/d_{10} \quad (4.1)$$

Onde: U = Coeficiente de uniformidade adimensional

- diâmetro efetivo ( $d_{10}$ ) de 0,16mm;
- $d_{60} = 0,45$ mm
- areia média com módulo de finura (MF) 2,89;
- coeficiente de uniformidade (U) 2,87.



**Figura 16.** Curva granulométrica da areia utilizada nos Leitos Cultivados com macrófitas.

(Ensaio realizado no Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP)

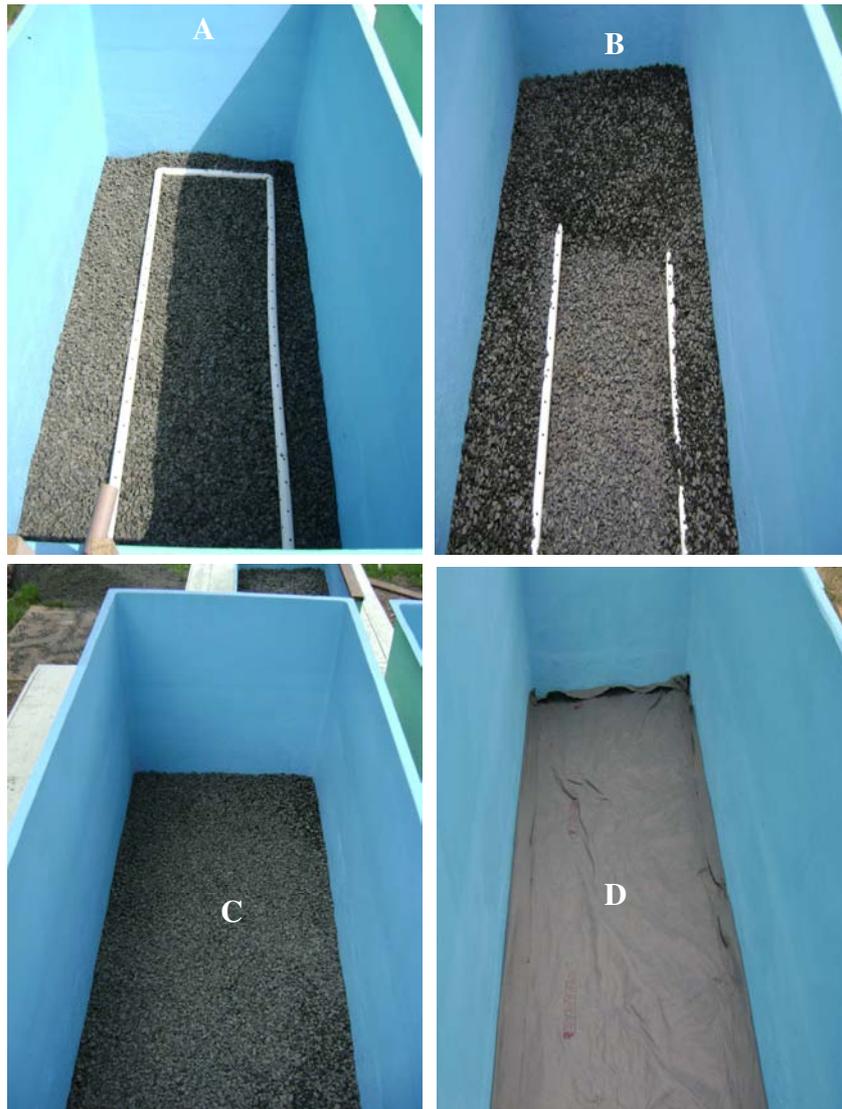
Destaca-se a dificuldade em encontrar em casas de materiais de construção areias com características semelhantes às aquelas preconizadas na literatura técnica.

Para alimentação dos LCFVs implantou-se uma caixa para receber o efluente da ETE em funcionamento por meio de bombeamento. O efluente, quando disposto sobre a superfície do módulo, intermitentemente, o inundaria percolando ao longo do perfil vertical do módulo de tratamento, sendo coletado no fundo por meio de um sistema de drenagem (Figura 17). Para a certificação da capacidade de percolação da areia foi adotado um ciclo de aplicações manual, utilizando-se como base um recipiente de volume conhecido (100L) para as aplicações intermitentes nos leitos. A tubulação de distribuição do efluente foi de PVC rígido DN 25mm e perfurada ao longo de toda a sua extensão longitudinal, com furos de 6mm e espaçamento de 10cm. Esta tubulação foi mantida suspensa sobre a camada de topo, constituída de brita 1, de forma a permitir a dispersão uniforme do esgoto ao longo do tanque. A tubulação de coleta, PVC rígido DN 50 mm, foi perfurada com furos de 10mm, na parte superior e nas laterais do tubo, ao longo de toda a extensão longitudinal. Os furos da parte superior foram espaçados em 10 cm e os furos laterais foram distribuídos entre os furos superiores. Esta tubulação foi assentada no meio da camada de fundo, constituída de brita 1 para coletar o efluente e encaminhá-lo ao LCFH. Sobre a camada de brita foi colocada uma manta de bidim para proteger os furos do tubo de coleta e assim evitar a entrada de areia nos furos. Foram utilizadas 02 linhas tanto para a distribuição quanto para a coleta do efluente, tal disposição teve como base a largura dos leitos.

Duas unidades de LCFVs foram idealizadas para trabalharem em paralelo e intermitentemente, porque esse tipo de aplicação promove um grande arraste de oxigênio para o maciço filtrante. Quando nova aplicação é realizada, o oxigênio anteriormente introduzido na massa sólida se mantém dentro da mesma e, somado com a nova quantidade de oxigênio arrastada por essa nova aplicação, a quantidade de oxigênio dentro do material filtrante torna-se suficiente para a degradação da matéria orgânica e oxidação da amônia. (COOPER et al., 1996 *apud* SEZERINO, 2006).

A macrófita utilizada, classificada como *Typha sp.* (popularmente conhecida como taboa), foi plantada considerando uma densidade de quatro mudas por metro quadrado, seguindo orientação de Valentim (1999) e Sezerino (2006). Essas macrófitas foram coletadas de uma área de várzea natural, localizada na própria Estância Árvore da Vida.

As Figuras 17 e 18 apresentam as etapas de construção do maciço filtrante dos LCFVs.



**Figura 17.** Montagem dos leitos cultivados com macrófitas de fluxo vertical: (A), (B) e (C) detalhe da tubulação de coleta do efluente e camada de fundo de brita 1, (D) manta de bidim sobre a camada de fundo de brita 1.



**Figura 18.** Montagem dos leitos cultivados com macrófitas de fluxo vertical: (A), (B) enchimento do filtro com areia grossa; (C), (D) colocação da camada de brita 1 sobre a areia e tubulação de distribuição do efluente.

A Figura 19 ressalta a tubulação de distribuição do efluente, suspensa por três linhas de fio, e seu funcionamento inundando o maciço filtrante.



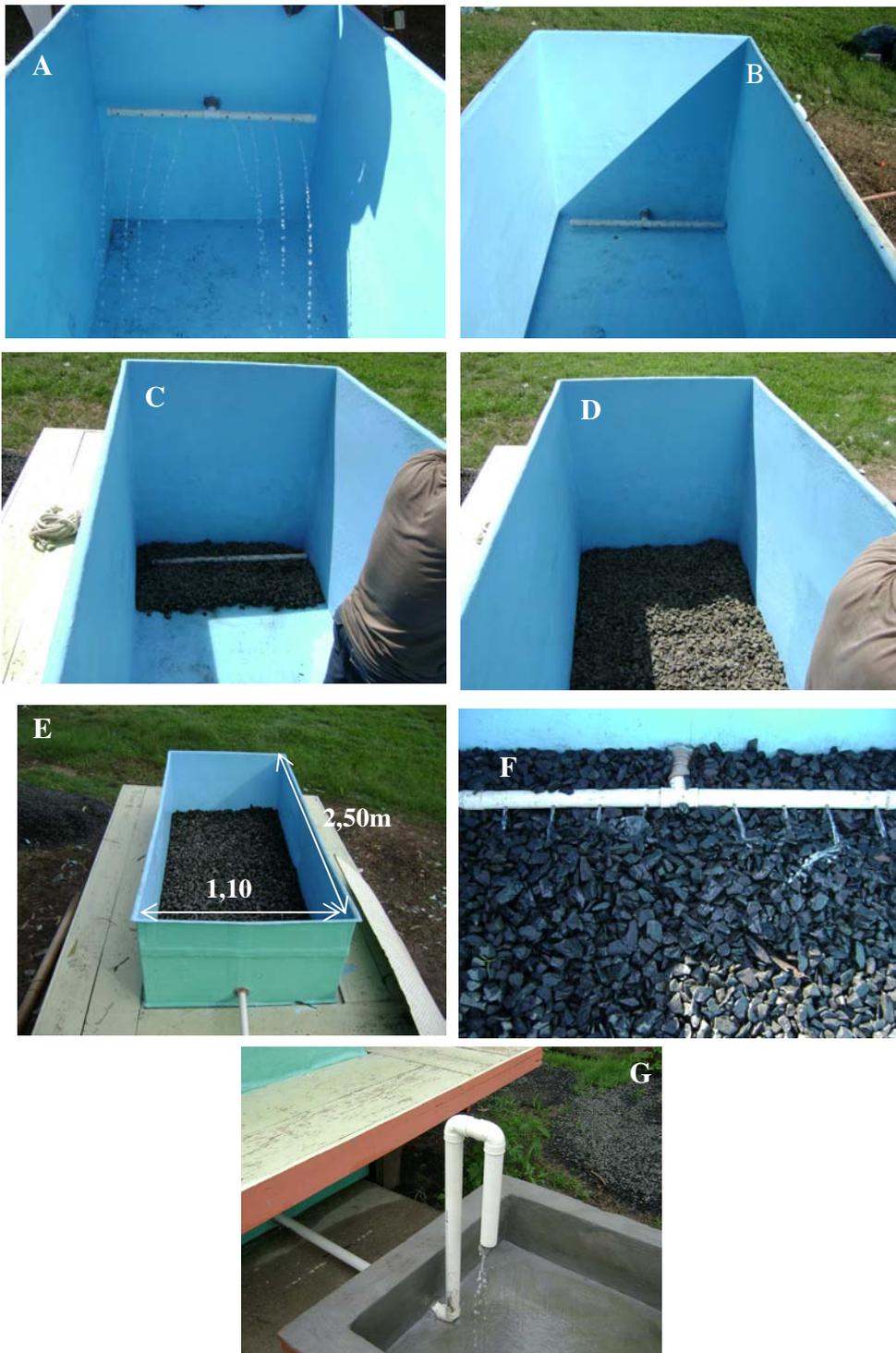
**Figura 19.** Tubulação de distribuição nos leitos de fluxo vertical suspensa por três linhas de fio.

#### 4.4.2.1.2 – Montagem dos Leitos de Fluxo Horizontal

Foi utilizado um tanque de fibra de vidro com formato retangular, área superficial  $2,75\text{m}^2$  e volume  $3,30\text{m}^3$ , com dimensões  $2,50\text{m} \times 1,10\text{m} \times 1,20\text{m}$ . O tanque foi preenchido com  $0,70\text{m}$  de material filtrante constituído de brita 2. As tubulações de alimentação e coleta, em PVC DN 50, foram dispostas no sentido transversal do leito. A tubulação de alimentação recebeu furos de  $8,5\text{mm}$  de diâmetro em uma lateral espaçados em  $10\text{cm}$  ao longo de todo seu comprimento, e a de coleta recebeu furos de  $10\text{mm}$  em uma lateral e na parte superior, sendo que os furos superiores foram espaçados em  $10\text{cm}$  e os laterais dispostos entre os furos superiores. O efluente a ser tratado foi disposto na porção inicial do leito, através de uma tubulação de entrada a  $0,70\text{m}$  do fundo do tanque (Figura 20-A e F), de onde percolava vagarosamente através do material filtrante até atingir a porção final, onde era coletado através da tubulação de coleta (Figura 20-C e B). Esta percolação tendia a seguir na horizontal porque era impulsionada por uma declividade de fundo de  $1\%$ .

A tubulação de coleta foi conectada a um tubo rotativo, que permitia a flexibilidade do controle do nível do efluente dentro do maciço filtrante (Figura 20-G). A altura do nível mantida dentro do leito era de  $0,65\text{m}$ . Esse leito era alimentado com o efluente dos LCFVs, e o efluente do LCFH foi encaminhado para o Canal de Cloração. Esse leito se enquadra na categoria do tipo Fluxo Horizontal Sub-Superficial (FHSS), com o nível de efluente mantido dentro do maciço filtrante a  $5\text{cm}$  da superfície.

Foi também plantada *Typha* sp. (popularmente conhecida como taboa) neste leito.



**Figura 20.** Leito cultivado com macrófita de fluxo horizontal. (A) tubulação de entrada do efluente PVC DN 40, (B) tubulação de coleta PVC DN 40, (C) e (D) enchimento do leito com brita 2, (E) dimensões do leito, (F) tubulação de entrada do efluente no leito preenchido com brita 2, (G) Tubo rotativo/controlador do nível de efluente no leito.

As especificações dos Leitos Cultivados estão apresentadas na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2-** Especificações dos leitos cultivados

<b>Item</b>	<b>Leitos de fluxo vertical</b>	<b>Leito de fluxo horizontal</b>
Área superficial (m <sup>2</sup> )	2,75 (2,50m x 1,10m)	2,75 (2,50m x 1,10m)
Volume útil (m <sup>3</sup> ) – calculado a partir da porosidade da brita ~ 50%	-	0,89
Declividade do leito (%)	-	1
Profundidade útil (m)	0,80	0,70
Altura da coluna d'água (m)	-	Variável até 0,65
Especificação da brita	nº 1	nº 2
Especificação da areia	Média – módulo de finura 2,89 Uniformidade – 2,87	-
Especificação da manta de proteção dos tubos (furos)	Bidim 2mm (espessura)	-
TDH	-	p/vazão de 581L.d <sup>-1</sup> – 1,5 dia p/vazão de 870L.d <sup>-1</sup> – 1 dia

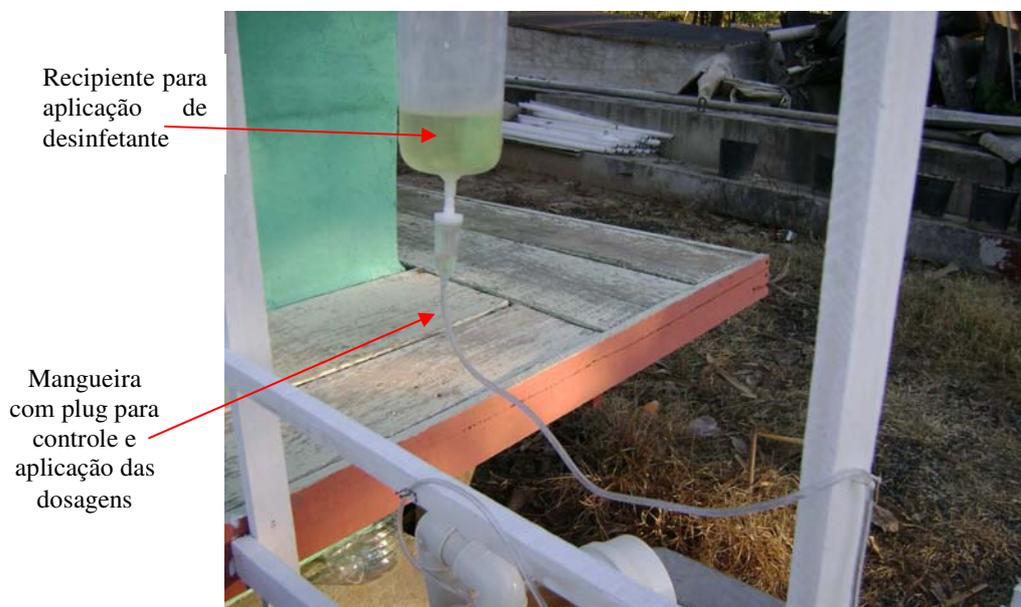
#### 4.4.3 – Canal de Desinfecção - Cloração



**Figura 21.** Canal de Cloração

Para realização dos testes nessa etapa foi construído um canal de PVC de 3,60m de comprimento e diâmetro de 100mm. O canal recebia o efluente do LCFH, e conforme ilustra a Figura 21, possui um contorno através de dois cotovelos de 90° com o objetivo de favorecer a descida da água, bem como aumentar a dimensão do canal. Esse recurso permitiu que o efluente percorresse um caminho maior, aumentando o tempo de contato dos microrganismos com o desinfetante. Para a homogeneização do efluente com o desinfetante, adaptou-se ao longo da

parte posterior do canal 6 degraus de madeira que funcionaram como barreiras no sentido de dar maior rapidez a essa homogeneização.



**Figura 22.** Detalhe do dispositivo para aplicação das dosagens de cloro

O equipamento para as aplicações de cloro resultou de uma simples adaptação; utilizou-se de um recipiente vazio (de soro fisiológico com  $V= 500$  ml) para colocação da solução de hipoclorito, juntamente com um sistema de macro-gotas e plug denominado “equipo” (próprio para soluções parenterais), para controle das quantidades de gotas de cloro aplicadas. Para o uso desse dispositivo, conforme mostram as Figuras 21 e 22, utilizou-se de uma grade de madeira como suporte para manter o frasco suspenso e viabilizar as aplicações do desinfetante durante a passagem do efluente no canal. A cloração ocorria somente quando se fazia as coletas de esgoto para avaliação laboratorial. Foi construída um caixa de tijolo cerâmico com dimensões  $0,80\text{m} \times 0,70\text{m} \times 0,23\text{m}$  para dar passagem ao efluente quando este não estava passando pelo canal de PVC. Esta mudança de escoamento era possível graças ao tubo rotativo na saída do leito de fluxo horizontal. Em seguida, o efluente escoava através de uma linha de drenagem, construída especificamente para o sistema experimental, para o manancial Ribeirão dos Toledos.

Foram utilizadas dosagens de hipoclorito de sódio de  $1,38\text{mL}^{-1}$  e  $1,06\text{mL}^{-1}$ . Essas dosagens foram aplicadas para condições de vazão máxima,  $4,7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ . Essa etapa entrou como

um estudo preliminar para se obter subsídios para o reúso do efluente dos Leitos Cultivados. Para tanto, pretendia-se utilizar um dispositivo de desinfecção simples, de baixo custo e de fácil manuseio operacional, sem a utilização de energia elétrica com a utilização de bombas dosadoras. Esse dispositivo, ao preço de R\$ 3,00, permitia adicionar as quantidades de gotas pretendidas a cada aplicação, sendo que cada 20 gotas correspondia 1ml de desinfetante aplicado.

A conotação dessa etapa foi investigar um dispositivo de baixo custo onde fosse possível o controle das aplicações de desinfetante, sem, contudo, demandar o uso da energia elétrica e ainda se adequasse à simplicidade dos leitos cultivados. As avaliações tiveram início somente após três meses do início das etapas anteriores e não ocorreu de forma criteriosa. Fatores como concentração e tempo de contato entre o desinfetante e os microorganismos não foram estudados, sendo consideradas apenas a vazão afluente máxima no Canal de Cloração e a quantidade de desinfetante aplicado. Sabe-se que todos os fatores associados à desinfecção são essenciais à confiabilidade do processo e, imprescindíveis, seja qual for o método de desinfecção utilizado, entretanto, o objetivo inicial desse trabalho, foi fundamentalmente, buscar subsídios preliminares que apontassem equipamentos simples e de baixo custo como potenciais sugestões para embasar estudos posteriores no sentido de complementar o tratamento de esgoto em sistemas simplificados como Leitos Cultivados.

Vale ressaltar que o presente trabalho foi efetuado no princípio de promover a confiabilidade e ampliar as possibilidades do reúso do efluente de Leitos Cultivados, bem como, promover a acessibilidade a esgoto tratado, especialmente, junto a comunidades carentes, ou em lugares onde a energia elétrica fosse de difícil acesso, como por exemplo, na zona rural.

## 4.5 – Cultivo dos Leitos

### 4.5.1 – Coleta e Plantio das Macrófitas



**Figura 23.** Disposição dos Leitos já cultivados com as macrófitas em fase de evolução

As macrófitas da espécie *Typha sp.* (popularmente conhecida como taboa) foram coletadas em áreas dentro da própria EAV. Devido a problemas de adaptação foi necessário o replantio de algumas mudas nos leitos. No primeiro plantio, as mudas utilizadas foram coletadas em uma área de várzea dentro da EAV. Essa área fica próxima ao Córrego Paraíso e, por questão de maior comodidade na retirada da planta do ambiente natural, fez-se a opção de coletá-las dentro do próprio rio.

A planta foi retirada do leito do rio apenas puxando-a, o que permitiu sua remoção com o sistema radicular. As macrófitas coletadas tiveram suas folhas e excesso das raízes cortadas através de facão, e em seguida condicionadas em sacos e transportadas até o sistema experimental através de trator.

As macrófitas foram plantadas sob uma densidade de 4 mudas por metro quadrado seguindo orientação de Valentim (1999) e Sezerino (2006).

Esse plantio foi efetuado diretamente no maciço filtrante (Figura 24-E) em todos os leitos no mesmo dia, utilizando-se 12 mudas para cada leito, tomando-se o cuidado de deixar a planta bem firme no maciço filtrante e com um caule em torno de 30cm acima da superfície do maciço, tanto nos leitos de areia como no de brita. Toda a matéria orgânica das raízes foi retirada através de lavagem com mangueira (Figura 24-C, D e E), e em seguida passou-se a fazer regas duas vezes ao dia com água potável durante 08 dias, sem muito rigor no volume e horários, com o objetivo de regar as plantas e, também, de fazer a lavagem da areia.

Observou-se um baixo desempenho das macrófitas nos leitos verticais após o primeiro mês, refletindo a existência de um problema de adaptação. Essa ocorrência parecia estar associada à retirada total da matéria orgânica das raízes antes do plantio direto no maciço filtrante, fato que já fora confirmado por Sezerino (2006) quando estudou a potencialidade de filtros de fluxo plantados com macrófitas no pós-tratamento de lagoas de estabilização. Segundo o pesquisador, o primeiro plantio nos filtros foi monitorado ao longo do período compreendido entre fevereiro e junho de 2005 e foi observado que o problema de adaptação das macrófitas ocorreu em consequência da reduzida permanência de umidade na rizosfera, devida à retirada completa da matéria orgânica das raízes após a colheita do ambiente natural, fato que o levou a fazer o replantio nos leitos deixando por completo a matéria orgânica nas raízes. O pesquisador também sugere ainda que seja mantida a saturação do maciço filtrante durante cinco dias após o replantio, com água e/ou esgoto.

Assim, optou-se por empregar as seguintes ações: (1) manter o maciço filtrante inundado com água potável por 6 (seis) dias, sem fazer o replantio, (2) após seis dias da inundação observou-se um efeito negativo como amarelamento e ressecamento da maioria das mudas, o que motivou o replantio dessas mudas. (5) Após o replantio, optou-se por não inundar mais o maciço filtrante, mas iniciar as aplicações com esgoto, sem um controle rigoroso na primeira semana, com o objetivo apenas de regar e fornecer nutriente para as plantas. A partir da segunda semana iniciaram-se as aplicações sistemáticas.

O replantio nos leitos seguiu os seguintes critérios: (1) inicialmente, replantou-se 11 mudas nos verticais e 03 no horizontal, preservando-se toda a matéria orgânica nas raízes advinda do

ambiente natural, (Figura 25). (2) as macrófitas restantes do primeiro plantio bem como as replantadas nos leitos de fluxo vertical foram substituídas gradativamente à medida que iam morrendo, (3) Devido à dificuldade de adaptação das macrófitas provenientes do rio nos leitos verticais, optou-se por coletar as novas mudas numa área de várzea onde as plantas ficavam enraizadas no solo alagado, (4) teve-se o cuidado, também, de adaptar mudas em vasos preenchidos com a mesma areia utilizada nesses leitos, buscando-se assim, adaptar mais rapidamente essas plantas num ambiente apenas úmido como os leitos verticais, antes de replantá-las nos leitos. Essas mudas eram regadas nos vasos, manualmente, com o efluente do leito horizontal, e a transferência para os leitos verticais só ocorria quando estas já apresentavam brotos (Figura 26). (5) no leito de fluxo horizontal, apesar de uma considerável adaptação das primeiras macrófitas (09 mudas), optou-se, por uma questão de comodidade, em fazer o replantio utilizando três mudas coletadas no mesmo ambiente que foi para os leitos verticais, na área de várzea alagada onde as plantas ficavam enraizadas no solo.



**Figura 24.** Primeiro plantio das macrófitas. (A) e (B) detalhe da retirada das taboas na área de várzea e cortes pontuais das folhas, (C) e (D) retirada da matéria orgânica das raízes (primeiro plantio), (E) plantio manual da macrófita direto no maciço filtrante sem que houvesse matéria orgânica nas raízes e inundação no maciço filtrante.



Matéria orgânica junto à raiz

**Figura 25.** Foto representativa da macrófita com matéria orgânica nas raízes para o replantio direto no maciço filtrante



**Figura 26.** (A) Mudanças plantadas em vasos preenchidos com a mesma areia dos leitos, como reserva para o replantio gradativo nos leitos de fluxo vertical, (B) replantio de muda com broto nos leitos de fluxo vertical

#### 4.6 – Manutenção do Sistema Experimental

O suprimento de efluente no sistema experimental foi efetuado manualmente, em batelada, seguindo os seguintes procedimentos: a) Iniciou-se as aplicações sistemáticas e controladas duas semanas após o plantio aplicando-se 150L de esgoto em cada leito vertical duas vezes ao dia, em intervalos das 7 às 8h e das 16 às 17h, totalizando um volume de 300L, sendo, correspondente a uma vazão de  $300\text{L.d}^{-1}$  ( $0,109\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ ) em cada leito vertical, durante 3,5 meses no período de 21/03/2008 a 05/07/2008; b) Após esse período, passou-se a aplicar 150L em cada leito vertical três vezes ao dia, incluindo mais uma aplicação às 12h, totalizando um volume de 450L em cada leito, correspondente a uma vazão de  $450\text{L.d}^{-1}$  ( $0,163\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ ) durante 2,5 meses no período de 06/07/2008 a 23/09/2008; c) O leito de fluxo horizontal recebia o efluente proveniente dos dois leitos verticais, também de forma intermitente. Dos 600L aplicados, inicialmente, nos leitos verticais, em média passavam para o leito horizontal 581L, correspondente à vazão de  $581\text{L.d}^{-1}$  ( $0,211\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ ). Para essa vazão o TDH no leito horizontal foi de 1,5 dias durante 3,5 meses; d) Após a inserção de mais uma aplicação de 150L nos leitos verticais, totalizou-se um volume aplicado de 900L, dos quais, passou em média para o leito horizontal 870L, correspondente à vazão de  $870\text{L.d}^{-1}$  ( $0,316\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ ). Para essa vazão o TDH no leito horizontal foi de 1 dia ao longo de 2,5 meses.

As aplicações em cada leito vertical ocorriam intermitentemente, e o intervalo de aplicação entre elas era somente o tempo de enchimento do tonel e aplicação individual em cada leito. A ordem das aplicações afluentes em cada leito era intercalada a cada aplicação, buscando-se dessa forma, evitar diferenças e dar aos dois leitos o máximo possível de regularidade.

#### 4.7.1 – Parâmetros de Qualidade

Para as análises laboratoriais foi utilizado o Laboratório de Saneamento da Faculdade de Engenharia Agrícola-UNICAMP. As metodologias de análise seguiram as orientações do *Standard Métodos for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA, WEF, 1998), conforme apresentadas na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3** – Métodos de análise dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos de qualidade da água

Parâmetro	Método
Turbidez	2130 B. Método Nefelométrico
Cor	2120 C. Método Espectrofotométrico
pH	4500 – H <sup>+</sup> B. Método Eletrométrico
Sólidos Totais	2540 B. Sólidos Totais (103° a 105°C)
Sólidos em Suspensão Totais	2540 D. Sólidos em Suspensão Totais (103°C a 105°C)
DBO	5210 B. Teste de DBO – 5 dias
DQO	5220 D. Método Calorimétrico de Refluxo Fechado
P	4500-PE. Método do Ácido Ascórbico
N-NH <sub>3</sub>	4500-NH <sub>3</sub> B. Método Titulométrico
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	4500-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> B. Método Espectrofotométrico
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	4500-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> B. Método Espectrofotométrico
Coliformes Totais	Método Colilert (Quanti-Tray) - IDEXX
<i>Escherichia coli</i>	Método Colilert (Quanti-Tray) - IDEXX

Para a interpretação dos resultados aplicou-se a análise de variância – ANOVA, com intervalos de confiança de 95% ( $p < 0,05$ ), utilizando-se o *software* Statistic 2005 (StatSoft, Inc., Statistica Release 7.1. Tulsa, Okalahoma: State Soft., 2005) para todos os parâmetros avaliados, afim de se verificar diferenças significativas entre o tratamento das unidades do Sistema Experimental.

#### 4.7.2 – Preparação, Coleta de amostras e Análise Laboratoriais

As coletas para análises laboratoriais ocorriam entre 7 e 8h com frequência semanal, a partir do processo em estudo: Efluentes da ETE em funcionamento, da Etapa Preliminar, dos Leitos Cultivados de Fluxo Vertical, do Leito Cultivado de Fluxo Horizontal e do Canal de Cloração.

As coletas iniciais, de abril a maio, eram realizadas somente em 5 pontos (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub>, P<sub>5</sub>)<sup>7</sup>, pois o Canal de Cloração foi implantado somente no terceiro mês de avaliação, sendo acrescentado a partir daí o sexto ponto de coleta, P<sub>6</sub>. Coletava-se 1,5L de efluente na saída da ETE em funcionamento e na entrada dos LCFVs, nos demais pontos, coletava-se 1L, totalizando 7L de efluentes, que eram conduzidos ao Laboratório de Saneamento da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, em frascos devidamente limpos e fechados. As avaliações eram iniciadas no mesmo dia, dando-se toda atenção a esse detalhe, especialmente para as análises de DBO<sub>5</sub> e Coliformes. As amostras para as demais avaliações eram conservadas sob refrigeração e as análises eram efetuadas durante um período máximo de 3 dias após a coleta.

Toda vidraria utilizada na análise do fósforo era lavada com ácido clorídrico (1:1) para retirada de qualquer resíduo de detergente existente nos frascos, e em seguida se efetuava a lavagem posterior com água destilada, com vistas à sua adequação em relação aos procedimentos de determinação desse parâmetro.

Os recipientes utilizados na coleta das amostras para análises microbiológicas tinham volume de 250ml. Estes, assim como toda a vidraria utilizada neste experimento, eram lavadas com água e autoclavados por 20 minutos. Tal procedimento buscava suprimir todos os microorganismos que poderiam interferir nos experimentos. Imediatamente após a coleta, os frascos eram postos no interior de uma caixa térmica, acondicionados com gelo e encaminhados para o laboratório.

---

<sup>7</sup> Ver Figura 7 página 62

## **5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1 – Macrófitas**

As macrófitas enraizadas no solo alagado (ambiente natural) apresentaram melhor adaptação nos leitos verticais do que as advindas do rio. Atribui-se esse fato à semelhança desse ambiente com o leito de areia, não saturado, porém úmido. Mais nítida ainda, foi a adaptação dessas macrófitas nos vasos, 100% das mudas brotaram, e ao serem transportadas para os leitos verticais já com o broto desenvolvido, houve uma perfeita adaptação. Uma vez que tanto os leitos verticais como os vasos eram preenchidos com a mesma areia, e igualmente, supridos com esgoto, atribui-se a melhor adaptação nos vasos ao fato destes terem sido colocados em lugar onde as plantas puderam receber sol pela manhã e sombra à tarde, fato que impedia o ressecamento total do maciço de areia entre as aplicações.

As macrófitas advindas do ambiente aquático (rio) tiveram um bom desempenho no leito de fluxo horizontal, isso se deve ao fato desse leito, além de ficar permanentemente inundado, ter fluxo horizontal semelhante à correnteza do rio.

Outro fato relevante associado a essas macrófitas nesse tipo de leito foi a adaptação de quase todas as mudas (09), mesmo com a retirada de toda a matéria orgânica das raízes, e ainda, parte das raízes, ressaltando a compatibilidade do ambiente natural dessas plantas com esse tipo de leito.

A Tabela 5.1 e as Figuras 27 a 34 apresentam a evolução das macrófitas, ressaltando seu desempenho ao longo da pesquisa.

**Tabela 5.1-** Cultivo e adaptação das macrófitas nos leitos cultivados

Data	<i>Typha ssp.</i> (leitos verticais)	<i>Typha ssp.</i> (leito horizontal)
06/03/2008	Plantio de 24 mudas – de rio	Plantio de 12 mudas – de rio
20/03/2008	Replanteio de 11 mudas (início) – de rio	Replanteio de 03 mudas – de brejo)
17/04/2008	03 mudas lançaram broto – de rio	09 mudas lançaram broto
30/03/2008 a 31/05/2008	Replanteio gradativo de 21 mudas– área de brejo (enraizadas no solo)	Não houve mais replanteio
06/05/2008	16 mudas lançaram 17 brotos	09 mudas lançaram 18 brotos
22/05/2008	24 plantas	27 plantas
21/06/2008	67 plantas	45 plantas
22/07/2008	93 plantas	58 plantas
24/08/2008	164 plantas	107 plantas
11/10/2008	Início da florescência	Início da florescência



**Figura 27.** Primeiro plantio de *Typha* nos LCFH e LCFV (06/03/2008)



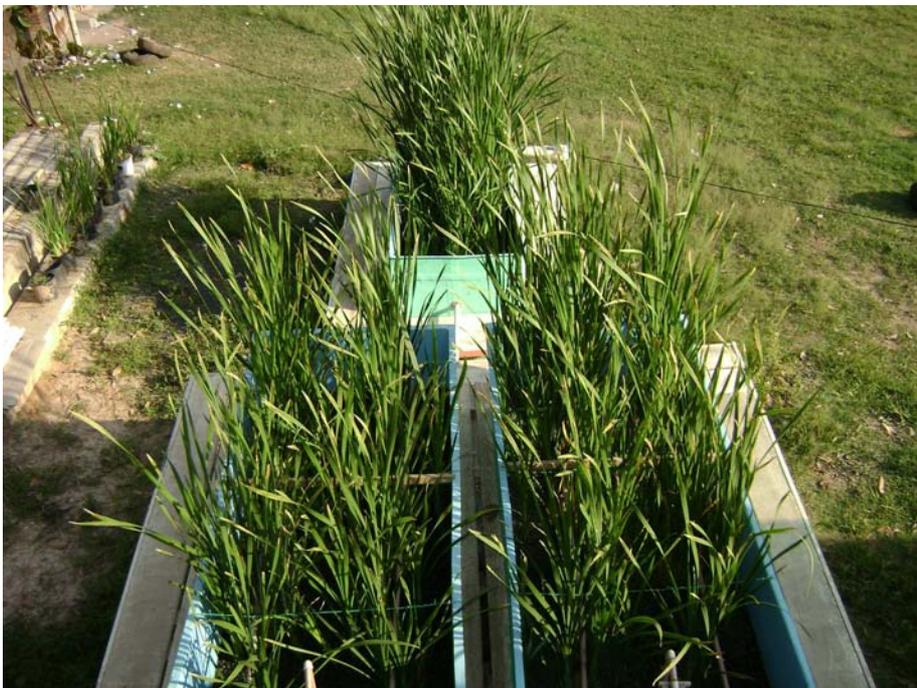
**Figura 28.** 09 semanas após o primeiro plantio nos Leitos Horizontais e em adaptação durante o replantio gradativo nos Leitos Verticais (24/05/2008).



**Figura 29.** Evolução das macrófitas já adaptadas e em fase de crescimento nos Leitos: 12 semanas após o primeiro plantio no Horizontal e já perfeitamente adaptadas nos Verticais (15/06/2008).



**Figura 30.** Evolução das macrófitas nos Leitos 17 semanas após o primeiro plantio no Horizontal e em evolução nos Verticais (23/07/2008).



**Figura 31.** Evolução das macrófitas nos Leitos 21 semanas após o primeiro plantio no Horizontal e em evolução nos Verticais (23/08/2008).



**Figura 32.** Evolução das macrófitas apresentando inflorescência nos leitos de fluxo vertical e horizontal  
(07/10/2008)

As macrófitas, desde o plantio apresentaram melhor adaptação e desenvolvimento no leito de fluxo horizontal, fato evidenciado no vigor, tamanho das folhas e das plantas (2,90m), na rapidez de multiplicação das plantas, quantidade e tamanho das flores. Nos leitos verticais as macrófitas cresceram vigorosas também, porém, sempre em menor intensidade. As plantas alcançaram um tamanho de 2,35m de altura, com verde menos intenso nas folhas e flores de menor tamanho (Figura 33).

Durante a pesquisa observou-se que praticamente não surgiu a presença de plantas invasoras.



**Figura 33.** Fotos ilustrativas das macrófitas demonstrando o vigor e comprimento da folhagem: (A e C) no Leito de Fluxo Horizontal, 2,90m; (B) desenvolvimento nos leitos verticais e horizontal.



**Figura 34.** Florescência das macrófitas: (A) nos Leitos de Fluxo Vertical; (B e C) no Leito de Fluxo Horizontal.

Ao longo dos grandes e longos eventos, as plantas apresentaram certo amarelamento das folhas e ressecamento das pontas, denotando certa intoxicação. Esse comportamento pode estar associado à sobrecarga devido ao tratamento inadequado da ETE em funcionamento, bem como,

ao maior volume de esgoto gerado nesses eventos e por períodos mais longos. Nas duas a três semanas subsequentes a esses eventos, elas apresentaram um desempenho excelente, inclusive o melhor, tanto em crescimento e cor das folhas, um verde intenso, como em número de plantas. Atribui-se esse comportamento à desintoxicação das plantas bem como ao aporte de nutrientes que se acumulou no sistema em consequência da carga lançada durante esses eventos.

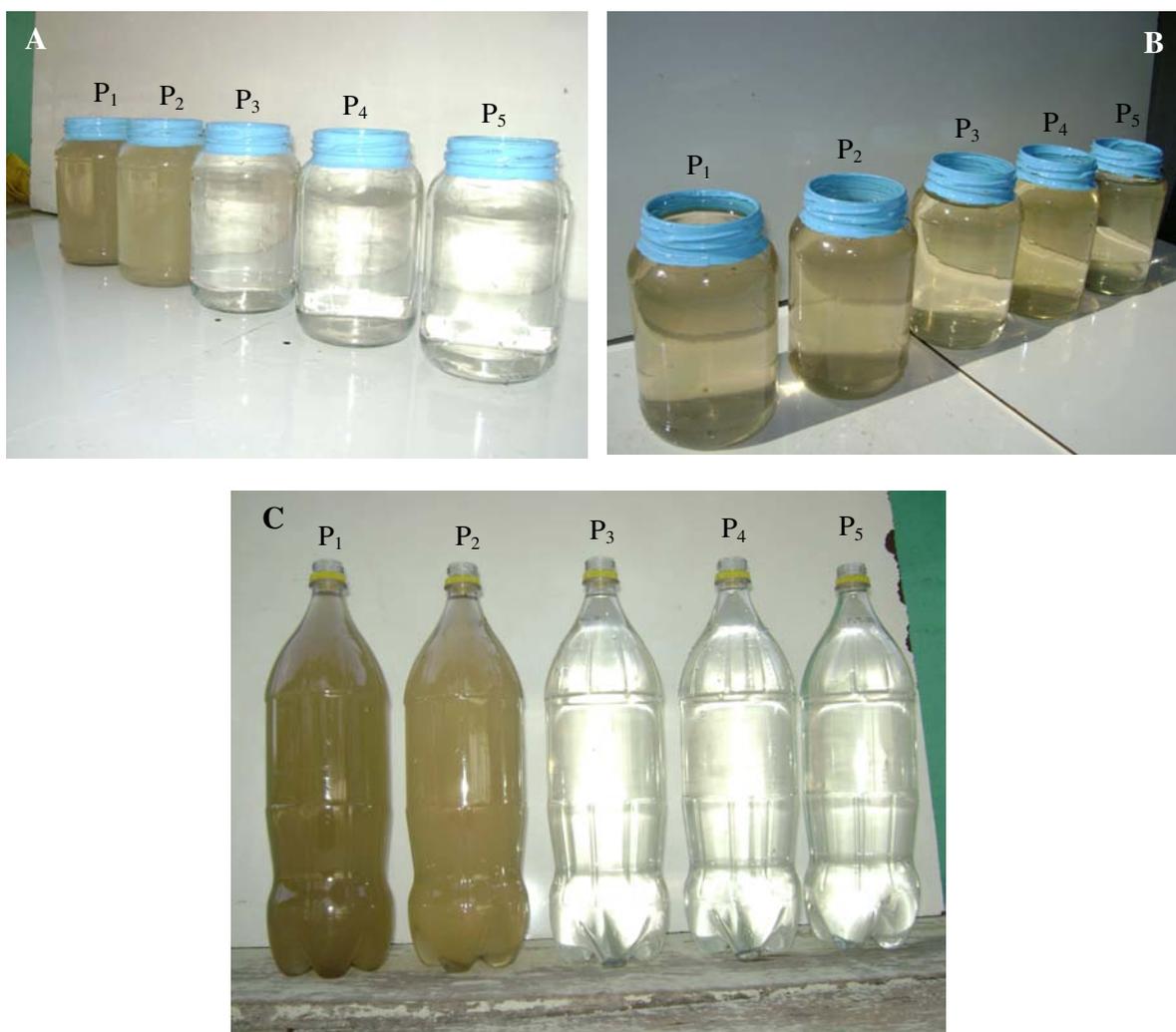
## **5.2 – Desempenho dos leitos cultivados com macrófitas**

O monitoramento do sistema transcorreu num período de 7 meses, e as análises laboratoriais perduraram por 6 meses, sendo que nos 2,5 meses iniciais, a população da variou de 500 a 1500 pessoas, permitindo assim, pouca variação no sistema de tratamento de esgoto da EAV, sendo, portanto, efetuada somente uma batelada por dia no sistema de lodo ativado da área. Essa constância favoreceu o bom desempenho do sistema experimental, que nesse período apresentou linearidade em todos os parâmetros. Entretanto, após 3 meses de operação, observou-se uma mudança no sistema, apresentando um forte pico de cor e turbidez nos três leitos. Tal fato esteve associado à parada do aerador (5cv) do tanque de equalização quando estava ocorrendo uma seqüência de eventos ao longo de 40 dias com flutuação populacional de 1000, 1500, 2300 e 2500 pessoas. Essa parada ocorreu justamente 1,5 semana antes do início do maior evento da seqüência, com uma população que flutuou entre 2000 e 2500 pessoas e com duração de 09 dias ininterruptos. O aerador continuou parado ao longo de todo o evento e ainda duas semanas após, com a ocorrência de outros eventos variando entre 1500 a 2000 pessoas com duração de 3 dias, ou seja, nos quatro dias entre eles, a população era de 500 pessoas. Observou-se que tal fato foi sentido pelas macrófitas que, nos primeiros dias, apresentaram um leve amarelamento e ressecamento nas pontas das folhas. O procedimento tomado foi diluir 50% do esgoto em água potável em uma das aplicações do dia. Assim, obteve-se um resultado notadamente positivo das macrófitas, que rapidamente refletiram um aspecto mais viçoso de suas folhagens. Esse procedimento ocorreu durante 03 dias, e, em seguida, voltou-se às aplicações somente com esgoto.

Apesar dessa turbulência, durante o percurso da pesquisa, todas as unidades do sistema apresentaram um desempenho com certa linearidade em todos os parâmetros. No decorrer do pico de turbidez, as macrófitas, após o stress dos três primeiros dias, apresentaram em todos os

leitos a melhor desenvolvimento/aparência, seja, em relação ao vigor e verde das folhas, seja ao crescimento e número de plantas, denotando assim, um maior aporte de nutrientes.

A recuperação da clarificação do efluente foi ocorrendo gradativamente ao longo de 3 semanas, após o aerador entrar em operação, em detrimento da flutuação populacional que continuava variando entre 500 a 2500 pessoas (Figura 35). Isso denotou a capacidade do sistema em suportar e se recuperar do stress devido à flutuação populacional.



**Figura 35.** Análise visual da eficiência do sistema nos pontos de coleta (P<sub>1</sub>,P<sub>2</sub>,P<sub>3</sub>,P<sub>4</sub>,P<sub>5</sub>)<sup>8</sup>: (A) antes da parada do aerador; (B) após 02 semanas da parada do aerador; (C) 03 semanas após a entrada em operação do aerador.

<sup>8</sup> P<sub>1</sub> = Efluente da ETE em funcionamento e afluente do Pré-filtro de brita, P<sub>2</sub> = Afluente aos LCFVs, P<sub>3</sub> = Efluente do LCFV<sub>1</sub>, P<sub>4</sub> = Efluente do LCFV<sub>2</sub>, P<sub>5</sub> = Efluente do LCFH.

Houve outro momento mais crítico ainda, quando da ocorrência de um evento com 5500 pessoas com duração de 09 dias ininterruptos. Observou-se uma alteração em todos os parâmetros, entretanto, o sistema apresentou potencialidade de atenuação.

Especificamente, em relação à cor e turbidez, a recuperação ocorreu por volta de 3 semanas, conforme se observa na saída do leito de fluxo horizontal e ao longo do canal de cloração na Figura 36, fato que indicou a potencialidade de recuperação do sistema.

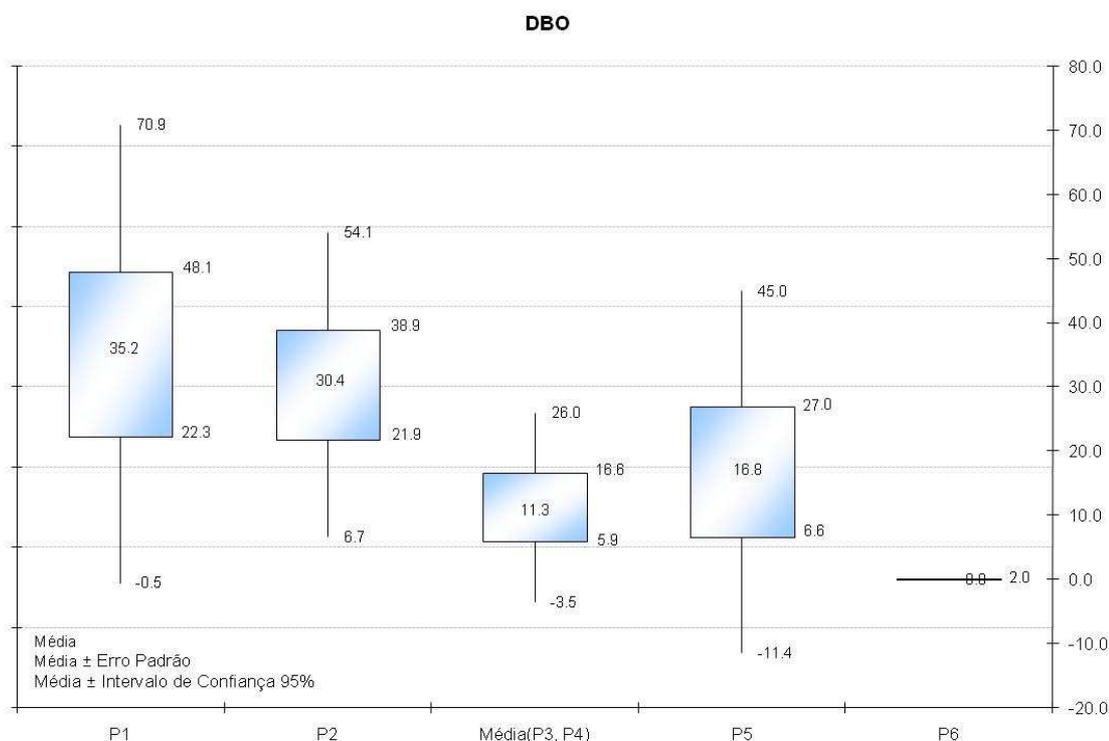


**Figura 36.** Efluente clarificado: (A) na saída do Leito de Fluxo Horizontal; (B) no canal de cloração.

Foram utilizadas duas vazões ao longo da avaliação, inicialmente,  $300\text{L.d}^{-1}$  em cada LCFV, totalizando  $600\text{L}$ , dos quais, em média passavam  $581\text{L.d}^{-1}$  para o Horizontal LCFH. Posteriormente,  $450\text{L.d}^{-1}$  em cada LCFV, os dois leitos totalizando  $900\text{L}$ , dos quais, passavam em média,  $870\text{L.d}^{-1}$  para o LCFH. Entretanto, não se observou alteração decorrente dessa mudança de vazão em nenhum parâmetro.

A evolução temporal e os valores dos parâmetros avaliados são retratados nas Figuras 37 a 54 e na Tabela 5.2.

## Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO<sub>5</sub>)



**Figura 37.** Gráfico tipo *boxplot*, destacando os valores referentes a DBO<sub>5</sub> (média, desvio padrão, 3 vezes o desvio padrão) obtidos com o monitoramento do Sistema Experimental ao longo de 07 meses.

É importante ressaltar que Leitos Cultivados se enquadram na categoria de sistemas naturais, que são submetidos às condicionantes climáticas, às dinâmicas biológicas e às variações de cargas orgânicas afluentes, e no caso específico desse estudo, ainda submetidos à flutuação populacional corrente na área de pesquisa.

O teste da DBO<sub>5</sub> retrata a quantidade de oxigênio requerida para estabilizar, através de processos bioquímicos, a matéria orgânica carbonácea. Assim, durante o teste houve um aumento da DBO<sub>5</sub> no efluente do LCFH, conforme apresenta a Figura 37 e a Tabela 5.2, de 48,6% de DBO<sub>5</sub> em relação aos LCFVs, com aumento da concentração de 11,3mgO<sub>2</sub>L<sup>-1</sup> para 16,8mgO<sub>2</sub>L<sup>-1</sup>.

Ressalta-se, entretanto, que a matéria orgânica no leito horizontal já se encontrava em franco estágio de estabilização. Sendo assim, o acréscimo da DBO<sub>5</sub> pode estar associado à

oxidação da amônia, levando à continuidade da nitrificação nesse leito. (METCALF e EDDY, 1991). A suposta nitrificação pode ter sido favorecida pelo arraste de oxigênio dos LCFVs para o LCFH.

Ao longo do período de avaliação da tratabilidade dos esgotos no Sistema Experimental, não se verificou diferença significativa estatisticamente, quando da aplicação do teste ANOVA, entre os efluentes das unidades do sistema para  $\text{DBO}_5$ .

O desempenho do sistema em termos de  $\text{DBO}_5$ , conforme mostra o gráfico do tipo *Box-plot* da Figura 37 e a Tabela 5.2, foi considerável. Os índices de remoção nos verticais foram de 62,5% com concentrações afluente e efluente  $30,4\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$  e  $11,3\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$ , respectivamente. No leito horizontal houve acréscimo de 48,6% comparativamente aos verticais nas concentrações afluente e efluente  $11,3\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$  e  $16,8\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$ , respectivamente. O desempenho global do sistema híbrido foi de 44,74% com concentrações médias afluente e efluente  $30,4\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$  e  $16,8\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$ , respectivamente.

Conley *et al.* (1991) avaliaram a eficiência de 40 sistemas de fluxo horizontal sendo utilizados como tratamento secundário de esgotos domésticos em vários países. Dentre os quais, 13 estavam instalados na Alemanha, 15 na Dinamarca, 7 no Reino Unido e 5 nos Estados Unidos. Os pesquisadores selecionaram 10 unidades e verificaram remoções de DBO, obtendo uma variação de 64% ( $150\text{mg DBO.L}^{-1}$  afluente,  $54\text{mg DBO.L}^{-1}$  efluente) a 94% ( $189\text{mg DBO.L}^{-1}$  afluente,  $11\text{mg DBO.L}^{-1}$  efluente).

Sezerino e Philippi (2000) demonstraram remoções médias de 87% para DQO e DBO, com concentrações médias de lançamento de  $80\text{mg DQO.L}^{-1}$  e  $34\text{mg DBO.L}^{-1}$ , respectivamente, em uma unidade residencial estimada para 5 pessoas

Gschlößl *et al.* (2004 *apud* Sezerino 2006), destacam que mais de 1.500 sistemas de tratamento na região da Bavária, sul da Alemanha, são compostos por lagoas de estabilização e filtros plantados com macrófitas (não se diferem dos leitos cultivados, é apenas questão de nomenclatura), combinados ou não. Segundo os pesquisadores, esta seqüência de tratamento conduz a uma excelente qualidade de efluente final, apresentando concentração média de  $40\text{mg DBO}_5.\text{L}^{-1}$ .

No presente trabalho, mesmo havendo um acréscimo de  $\text{DBO}_5$  no horizontal, ainda foram alcançados valores de remoção no Sistema Híbrido (global) de 44,74% e concentração efluente

16,8mgO<sub>2</sub>L<sup>-1</sup>. Comparativamente aos referidos pesquisadores, esses resultados estão inferiores, porém, não discrepantes, principalmente, quando associados à concentração final. Os valores obtidos estão abaixo dos recomendados por USEPA (1992) para reúso urbano restrito, reúso agrícola de culturas não-alimentícias, reúso recreacional restrito, reúso ambiental, reúso industrial. Para esses usos, essa legislação estabelece DBO<sub>5</sub> < 30mO<sub>2</sub>mgL<sup>-1</sup>.

### Demanda Química de Oxigênio (DQO)

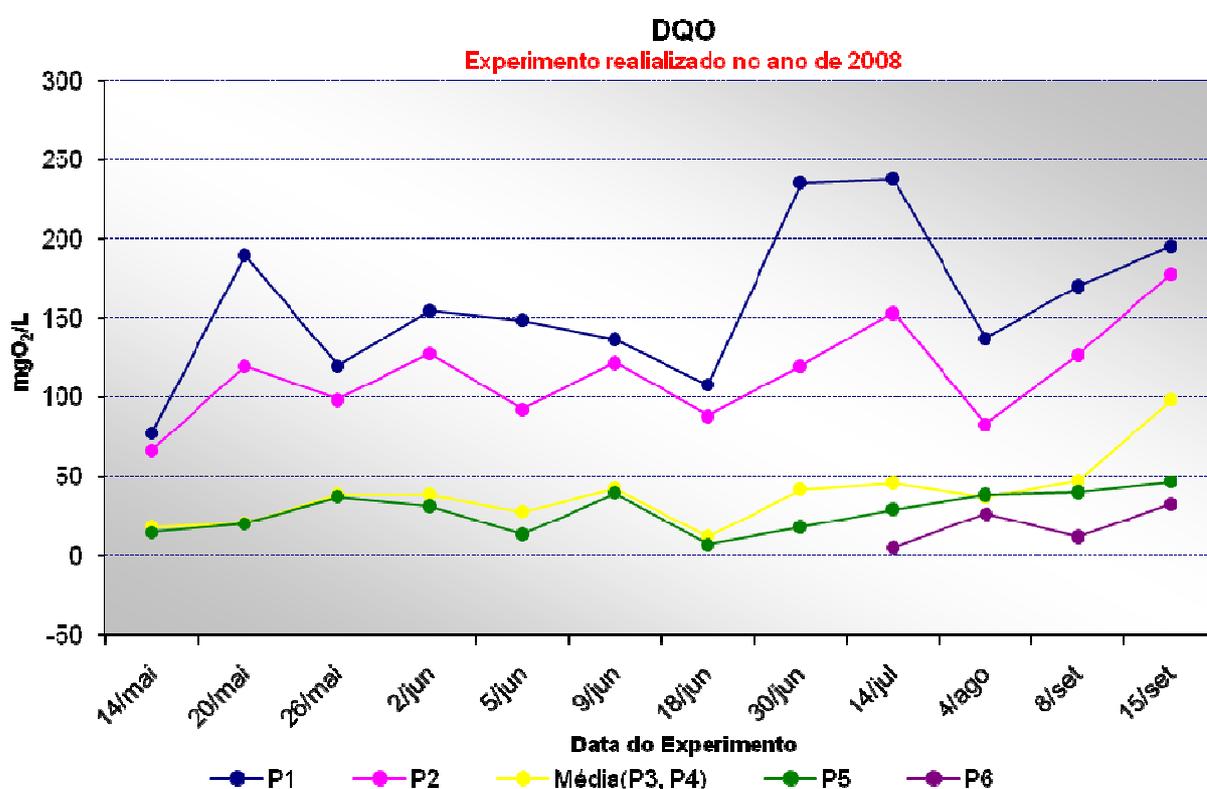


Figura 38. Comportamento evolutivo da DQO no Sistema Experimental

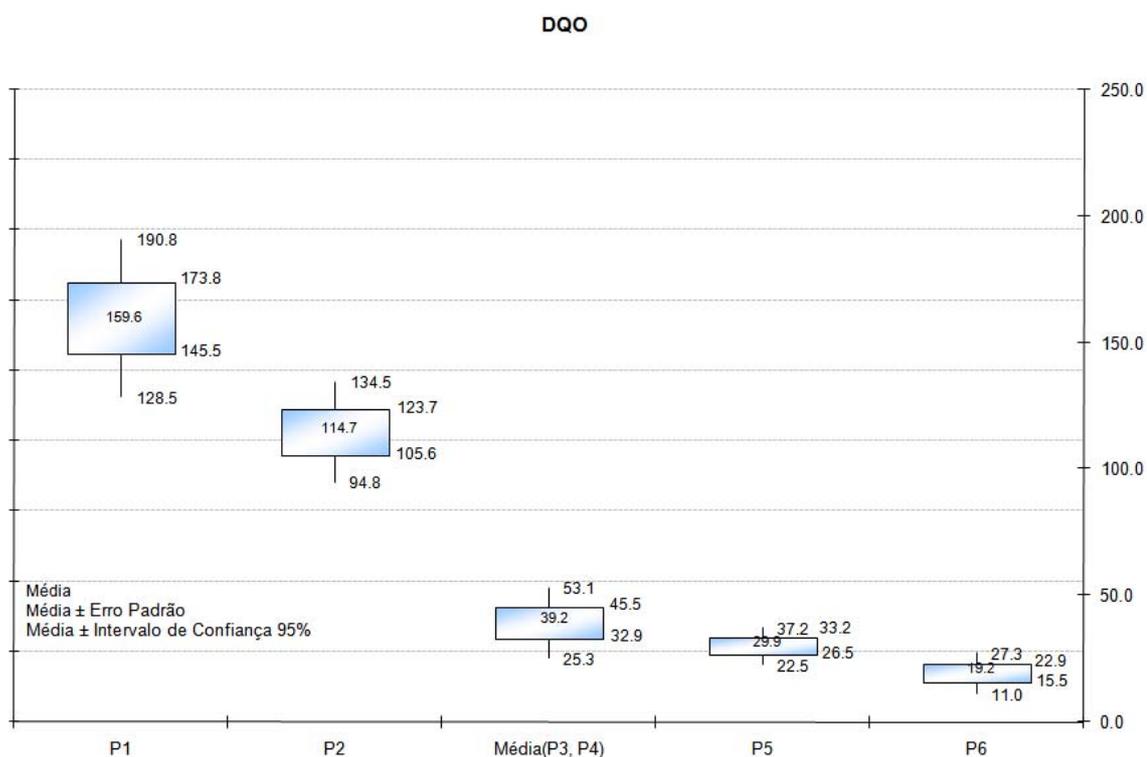
A análise da DQO teve início a partir do 2º mês de avaliação e os resultados traduziram uma boa eficiência do sistema. Os maiores picos ocorreram na 2ª, 8ª, 9ª e 12ª amostragens, contudo, tanto os leitos verticais quanto o horizontal atenuaram bastante a concentração de DQO no efluente. O bom desempenho, no 1º mês, pode ter ocorrido pela atuação de bactérias facultativas e anaeróbias fixadas no meio suporte, pois as macrófitas ainda estavam em fase de adaptação.

Os altos valores da DQO na 8<sup>a</sup> e 9<sup>a</sup> amostragens estão associados à parada do aerador do tanque de equalização (5cv) quando estava ocorrendo uma seqüência de eventos. Durante essa parada, por 3,5 semanas, ocorreu o maior evento da série, com população entre 2000 e 2300 pessoas ao longo de 9 dias. Apartir de 04/agosto a 15/setembro houve um crescimento nos índices de DQO em função da continuidade dos eventos. No período de 08/setembro a 15/setembro, a população de uso da área foi a maior durante a pesquisa, cerca de 5500 pessoas com permanência de 9 dias ininterruptos na área. Essa variação populacional foi refletida no efluente de todas as unidades, com pico de crescimento, mas notadamente atenuado no LCFH.

Ressalta-se que a variação populacional, somada às condições operacionais de turbulência em que se encontrava a ETE em funcionamento, foram os itens mais impactantes no Sistema Experimental. Nos valores de DQO, essa interferência foi mais notável ainda nos eventos com duração ininterrupta de 09 dias. Vale informar que a maioria dos eventos tinha duração de 03 a 04 dias, ocorrendo um intervalo entre eles, com população reduzida (500 pessoas). Nessa realidade, em detrimento do número de pessoas nos eventos, o sistema tendia a se manter estável.

A média de remoção de DQO, em termos percentuais, entre a entrada e saída dos LCFVs foi de 65,8%, e no LCFH, comparativamente à entrada nos verticais (global), foi de 74%. As médias percentuais de remoção obtidas nesse experimento foram inferiores às encontradas no sistema híbrido de Sezerino (2006) que alcançou médias de remoção de DQO de 66% na saída dos leitos verticais em relação ao efluente de lagoa anaeróbia, e 83% na saída do horizontal em relação ao efluente (misturado) de todos os leitos verticais. Sendo que, esse pesquisador utilizou areia como meio filtrante, tanto nos verticais quanto no horizontal, este último se diferenciando do sistema estudado nesse trabalho, que tinha como meio suporte, brita 02.

O gráfico tipo *boxplot* da Figura 39 destaca os valores da média, média  $\pm$  erro padrão e média  $\pm$  intervalo de confiança 95% obtidos com o monitoramento do Sistema Experimental de 14/maio a 15/setembro.



**Figura 39.** Gráfico tipo *boxplot*, destacando os valores referentes a DQO (média, desvio padrão, 3 vezes o desvio padrão) obtidos com o monitoramento do Sistema Experimental ao longo de 07 meses.

Os valores médios de concentração encontrados para DQO no afluente aos LCFVs foi de  $123,7 \pm 105,6 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}$  e no efluente,  $45,5 \pm 32,9 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}$ . No efluente do LCFH os valores encontrados foram de  $33,2 \pm 26,5 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}$ . E, após a cloração, devido a oxidação da matéria orgânica, os índices caíram para  $22,9 \pm 15,5 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}$ .

Ao longo do período de avaliação da tratabilidade dos esgotos no Sistema Experimental, verificou-se diferença significativa estatisticamente, quando da aplicação do teste ANOVA, entre os efluentes de todas as unidades do sistema para DQO.

O efluente gerado pelo sistema híbrido cumpriu a legislação do Estado de Minas Gerais quanto ao lançamento de águas residuárias em corpos hídricos (COPAM, N<sup>o</sup> 10, 1986), apontando para o amadurecimento dos leitos. Esta norma legal estabelece para DQO o limite de  $90 \text{ mgL}^{-1}$ , considerado um valor extremamente restritivo por Von Sperling e Nascimento (1999).

Ressalta-se, entretanto, que em todas as amostragens avaliadas, os valores de DQO no efluente de todos os leitos foram abaixo do estipulado por essa legislação, indicando, assim, que para esse parâmetro, a etapa de LCFVs já era suficiente para adequar o efluente à legislação referida.

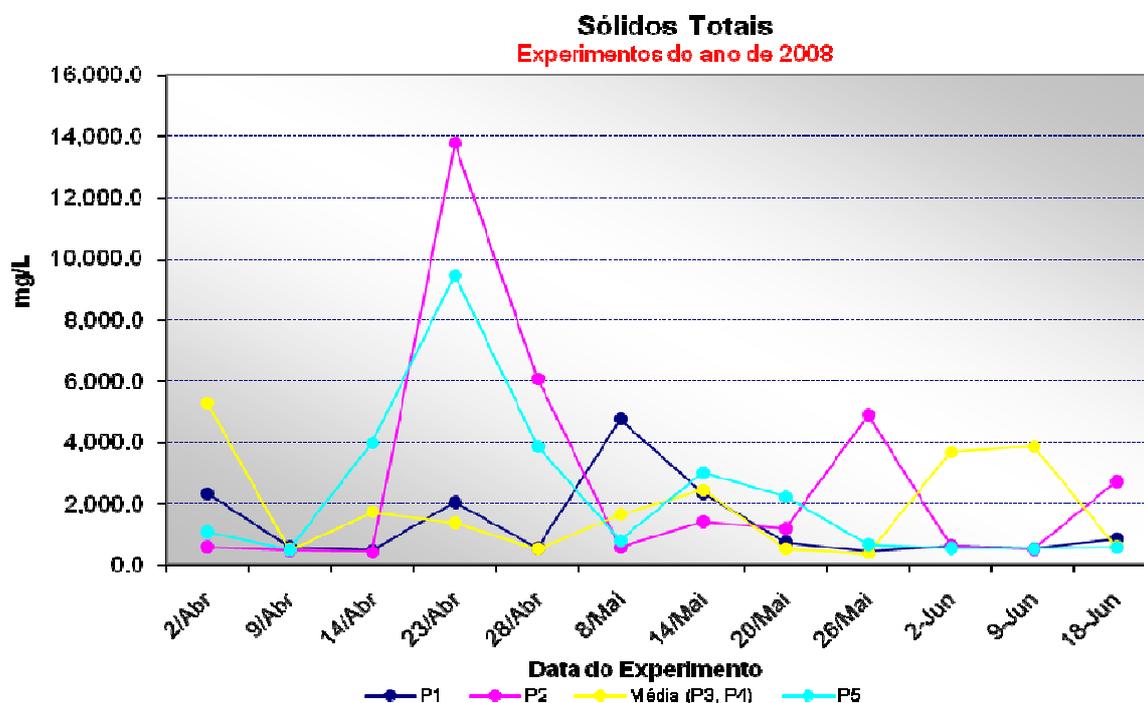
Tratando-se de reúso, a média das concentrações de DQO no efluente dos LCFVs ( $39,2\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$ ) e do LCFH ( $29,2\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$ ) foram inferiores aos valores apresentados por Mancuso e Santos (2003) para a água do projeto de reúso em parque temático nas proximidades da cidade de São Paulo no período de dez/1999 a jul/2001, cujo valor encontrado foi de  $40\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$  quando o limite era  $\leq 60\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$  (Tabela 3.1), e superiores ao valor alcançado para água do projeto realizado pela Sabesp em parceria com a prefeitura de São Caetano do Sul-SP em março/2001, onde foi alcançado o valor de  $18\text{mgL}^{-1}$  (Tabela 3.2). No parque temático, o esgoto bruto proveniente dos sanitários, bares e restaurantes era tratado por processo de lodos ativados, não convencional, com separação da biomassa feita por membranas de microfiltração, e desinfetado com hipoclorito de sódio. Esse efluente tratado era armazenado em reservatório e conduzido através de sistema duplo de distribuição para uso em descargas sanitárias e irrigação de jardins e gramados.

Sendo assim, a relevante colocação feita pelos pesquisadores ao ressaltarem esses projetos como exemplos bem sucedidos, bem como, a qualidade do efluente final do Sistema Experimental em termos de DQO, apontam Leitos Cultivados como tecnologias promissoras no âmbito do reúso de água no Brasil.

### **Sólidos Totais (ST)**

Observa-se pelo gráfico da Figura 40 que o sistema, em termos de ST, apresentou turbulência no primeiro mês de funcionamento, com altas concentrações de sólidos na 4ª semana. Nas semanas posteriores ainda apresentou instabilidade, mas já entrando em fase de estabilização. Atribui-se esse fato à flutuação populacional da área, bem como ao ajuste natural do sistema, considerando que nesse período o próprio meio filtrante (areia, brita), também, contribuía com certo teor de sólidos. Entretanto, após 1,5 mês já era perceptiva a tendência de estabilidade do sistema.

Os resultados para esse parâmetro foram obtidos utilizando-se uma única vazão, de 300L.d<sup>-1</sup> em cada leito vertical e em média 581L.d<sup>-1</sup> no horizontal.



**Figura 40.** Comportamento evolutivo de ST no Sistema Experimental ao longo de 03 meses

As avaliações dos sólidos transcorreram em períodos com baixas populações, variando entre 340 a 800 pessoas com exceção dos dias 18/4 a 23/4, quando estiveram presentes 3500 pessoas. Esse fato foi bem registrado pelo sistema, onde se obteve o maior pico em termos de ST. No ponto de coleta P<sub>2</sub> (Efluente da etapa preliminar e afluente aos LCFVs) foi encontrada uma quantidade de sólidos superior ao P<sub>1</sub> (Efluente da ETE em funcionamento e afluente à etapa preliminar) em quase todas as semanas, inclusive, picos bem mais elevados, evidenciando que houve arraste de sólidos da etapa preliminar (pré-filtro de pedra, caixa de passagem e caixa com dreno/filtro) para os LCFVs.

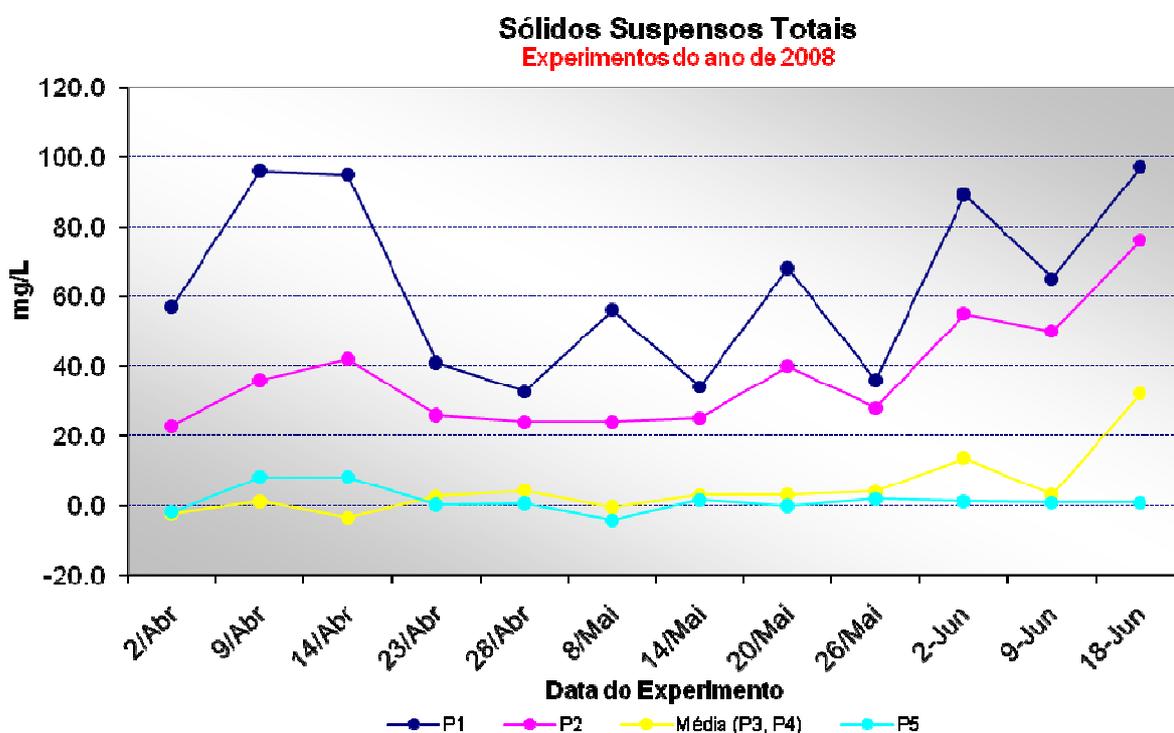
Apartir da 8<sup>a</sup> semana observou-se uma alternância entre todos os pontos. Essa variação foi reflexo da fase de ajustamento em que o sistema se encontrava, quando as macrófitas ainda estavam em processo de adaptação. Além disso, estava ocorrendo gradativamente o replantio de algumas mudas, conforme ocorria mortandade, principalmente nos LCFVs. Apartir da 12<sup>a</sup>

semana ocorreu um pico de sólidos na saída dos leitos verticais associado ao replantio de 03 mudas em cada leito, 02 dias antes da coleta. Entretanto, no horizontal ocorreu estabilidade nesse mesmo período, observando-se capacidade de atenuação do LCFH. Essa linearidade no horizontal pode ter ocorrido em consequência de o biofilme ter se estabelecido, já que nesse leito a maioria das mudas se adaptaram desde o primeiro plantio, não sendo necessário um replantio gradativo como nos LCFVs.

### Sólidos Suspensos Totais (SST)

Com respeito aos SST, o sistema apresentou um perfil de linearidade no desempenho, com expressivas remoções durante toda a pesquisa.

Conforme expresso no gráfico da Figura 41, os pontos P<sub>1</sub> e P<sub>2</sub>, entrada e saída da etapa preliminar, apresentaram um comportamento semelhante, com boas remoções em P<sub>2</sub> ao longo de todas as semanas, denotando atenuação de SST nessa etapa.



**Figura 41.** Comportamento evolutivo de SST no Sistema Experimental

Houve redução acentuada de SST no efluente dos LCFVs e LCFH em todas as semanas, sendo que, até a 7<sup>a</sup> semana houve certa alternância na saída dos verticais e do horizontal, entretanto, a partir da 8<sup>a</sup> semana o sistema já apresentava um perfil de estabilidade, denotando tendência a entrar em regime.

Nas duas últimas semanas, houve aumento de sólidos na saída da ETE em funcionamento, na saída da etapa preliminar e na saída dos LCFVs, entretanto, o efluente do LCFH continuou estável, o que pode ser traduzido como capacidade de atenuação do leito. Essa atenuação pode ser entendida como o resultado da filtração pelo meio suporte, bem como, da adsorção das partículas exercida pelas bactérias aderidas no maciço filtrante.

Apesar das grandes variações na concentração de SST afluente aos leitos devido à dinâmica da flutuação populacional na área, e às condições de turbulência operacional da ETE em funcionamento, os efluentes dos LCFVs, bem como do LCFH, apresentaram pequena variação ao longo da pesquisa. Isso ressaltou a potencialidade desse tipo de sistema no tratamento de efluentes, reforçando seu potencial na absorção de carga de choque.

Valentim (2003) avaliou 06 (seis) Leitos Cultivados de fluxo subsuperficial com meio filtrante constituído de brita 02 (diâmetro de 55 a 90mm) operando como pós-tratamento de (01) um Tanque Séptico Modificado para diferentes TDH (1 a 6 dias), e verificou percentuais de remoção de 40 a 81% , sendo considerada pelo pesquisador como boa capacidade de remoção do sistema.

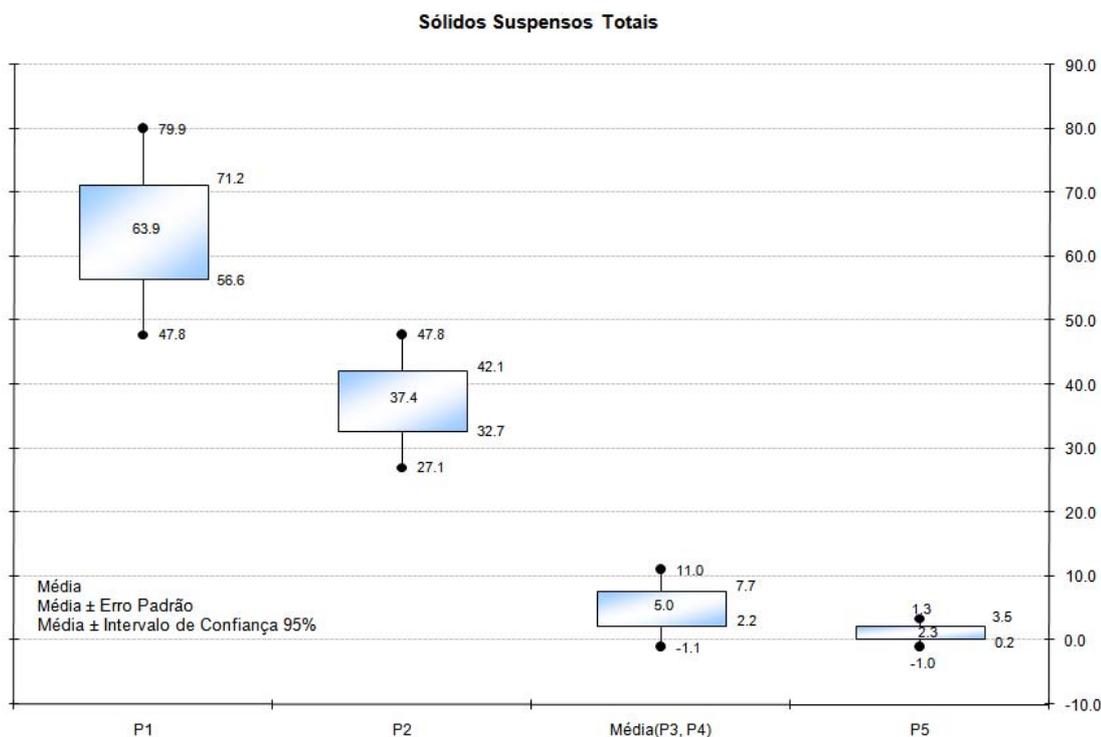
No presente estudo, em termos percentuais, o tratamento médio nos LCFVs foi de 86,63% (concentrações afluente e efluente, 37,4 mgL<sup>-1</sup> e 5 mgL<sup>-1</sup>, respectivamente), e a média global na saída do LCFH comparativamente à entrada nos LCFVs foi de 93,85% (concentrações afluente e efluente, 37,4 mgL<sup>-1</sup> e 2,3 mgL<sup>-1</sup>, respectivamente). A superioridade dessa remoção, comparativamente ao trabalho mencionado está associada, essencialmente, aos leitos verticais com meio filtrante constituído de 0,60m de areia, que precediam o leito horizontal, onde foi observada uma maior capacidade de atenuar SS. O leito de fluxo horizontal tinha como meio filtrante brita 2.

Esta elevada eficiência de remoção, considerando ainda, a deficiência operacional em que se encontrava a ETE em funcionamento do local do experimento, reforça a tese da aplicação desse tipo de sistema como unidade de polimento de efluente. Nesse estudo específico, para

efluente de lodo ativado, entretanto, dentre vários autores, Valentim (2003), que utilizou efluente de Tanque Séptico Modificado - TSM e Sezerino (2006), efluente de lagoa anaeróbia, já ressaltavam esta tese de aplicação.

No gráfico tipo *boxplot* da Figura 42 observa-se a qualidade do efluente em termos de SST, cujas médias declinam ao longo das unidades do sistema. Verificou-se diferença significativa estatisticamente, quando da aplicação do teste ANOVA, entre os efluentes de todas as unidades do sistema para SST. Pode-se afirmar que a qualidade do efluente, em termos de SS é excelente, apresentando concentração de  $7,7 \pm 2,2 \text{ mgSSL}^{-1}$  nos LCFVs e  $3,5 \pm 0,2 \text{ mgSSL}^{-1}$  no LCFH. Esses valores atendem perfeitamente aos requisitos de qualidade para água de reúso em agricultura e paisagismo, segundo o “Título 22 do Código da Califórnia”.

Ressalta-se também que os valores médios, de  $5\text{mgL}^{-1}$  alcançados nos LCFVs e  $2,3\text{mgL}^{-1}$  no LCFH, estão abaixo dos obtidos na água de reúso do Projeto São Caetano. Os parâmetros adotados para esse projeto foram baseados na legislação do Estado da Califórnia – Estados Unidos e nas recomendações da OMS.



**Figura 42.** Gráfico tipo *boxplot*, destacando os valores referente a SST (média, desvio padrão, 3 vezes o desvio padrão) obtidos com o monitoramento do Sistema Experimental

## Turbidez

A remoção da turbidez, representada no gráfico da Figura 43 apresenta valores muito próximos para os LCFVs e para o LCFH. Observa-se que as variações afluentes foram atenuadas nos leitos, principalmente nos leitos verticais, resultando num efluente final com excelente clarificação. Como a turbidez, também, está relacionada com os sólidos dissolvidos, é provável que essa atenuação esteja associada à capacidade de adsorção da areia e do extenso sistema radicular da *Typha sp.*, de modo que a turbidez do efluente de todos os leitos tenha se mantido estável ao longo das semanas. Pode-se verificar que a estabilidade de funcionamento dos LCs com respeito à remoção de Turbidez foi altamente positiva, pois as variações de concentração afluente que ocorreram foram assimiladas pelo sistema.

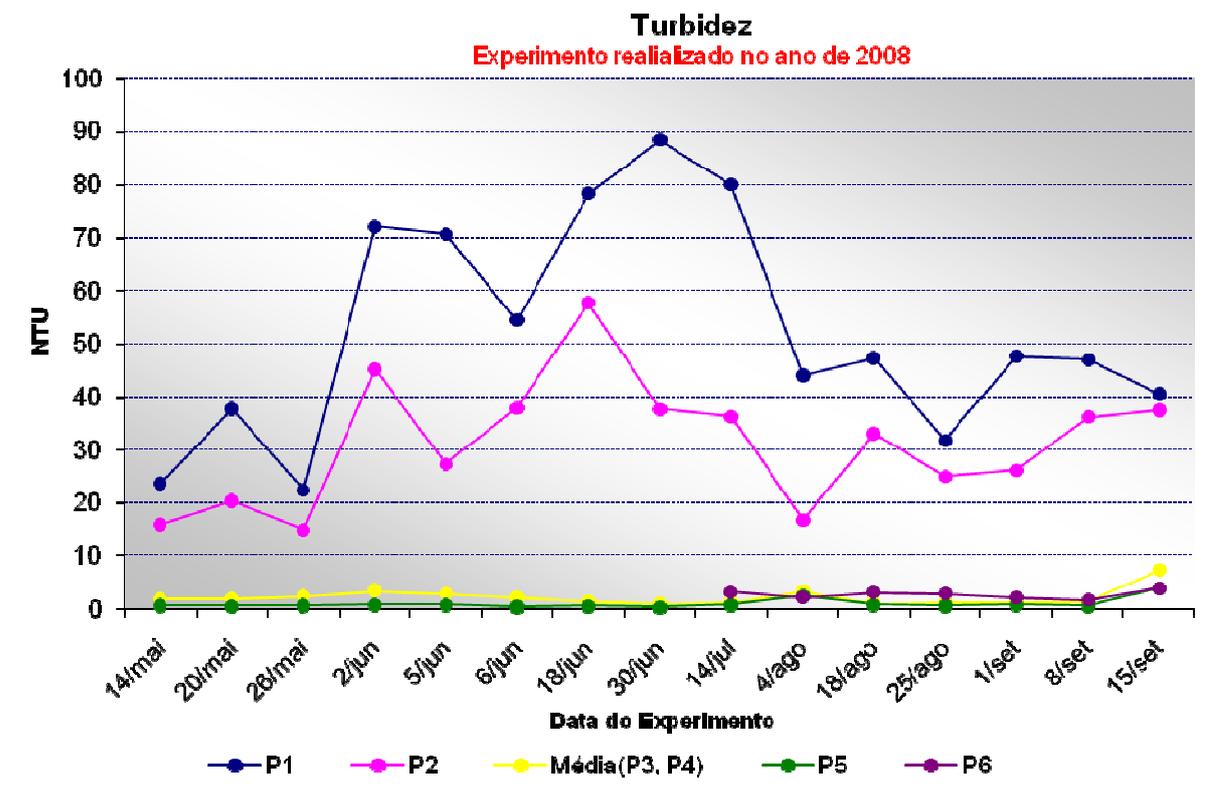
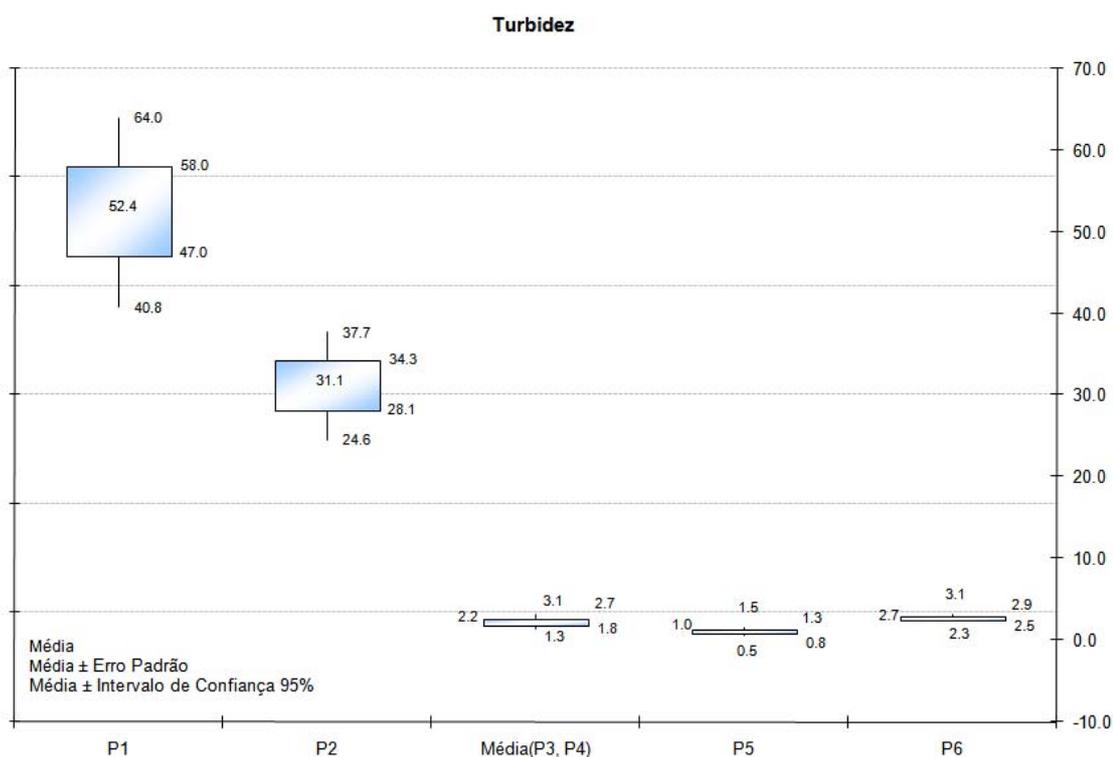


Figura 43. Comportamento evolutivo da Turbidez no Sistema Experimental

Observa-se uma forte variação na turbidez entre a sexta e décima semana. Nesse período houve a parada do aerador do tanque de equalização (5cv) quando ocorria uma seqüência de eventos, dentre eles, uma conferência com a população variando entre 2000 a 2300 pessoas por um período de 9 dias ininterruptos. Isso prejudicou a qualidade do efluente da ETE em funcionamento, bem como, do Sistema Experimental. Após a ligação do aerador, o sistema se recuperou em torno de 3,5 semanas. Nas últimas 3 semanas observa-se outra tendência de pico em consequência de um aumento na população de uso da área de 500 para 5500 pessoas. A cor do efluente na saída dos leitos permanece quase que inalterada.

O sistema, em todas as unidades, apresentou eficiência excelente em termos de remoção de turbidez, com média de percentuais de remoção entre a entrada e saída dos LCFVs de 92% e média global, comparativamente à entrada nos LCFVs e saída no LCFH de 96%.

Pode-se ver a qualidade do efluente ao longo do sistema através do gráfico tipo *Box-plot* da Figura 44, onde praticamente toda turbidez do efluente da ETE em funcionamento foi removida no sistema. O afluente ao sistema experimental foi bastante atenuado na etapa preliminar (pré-filtro de pedra, caixa de passagem, caixa de passagem com dreno/filtro), e nos leitos obteve-se índices bastante altos de remoção.



**Figura 44.** Gráfico tipo *boxplot*, destacando os valores referentes a Turbidez (média, desvio padrão, 3 vezes o desvio padrão) obtidos com o monitoramento do Sistema Experimental ao longo de 07 meses.

Pode-se afirmar que a qualidade do efluente final, em termos de turbidez, é excelente, apresentando concentrações efluentes de  $33,3 \pm 28,1$  NTU na fase preliminar,  $2,7 \pm 1,8$  NTU nos LCFVs e  $1,5 \pm 0,8$  NTU no LCFH.

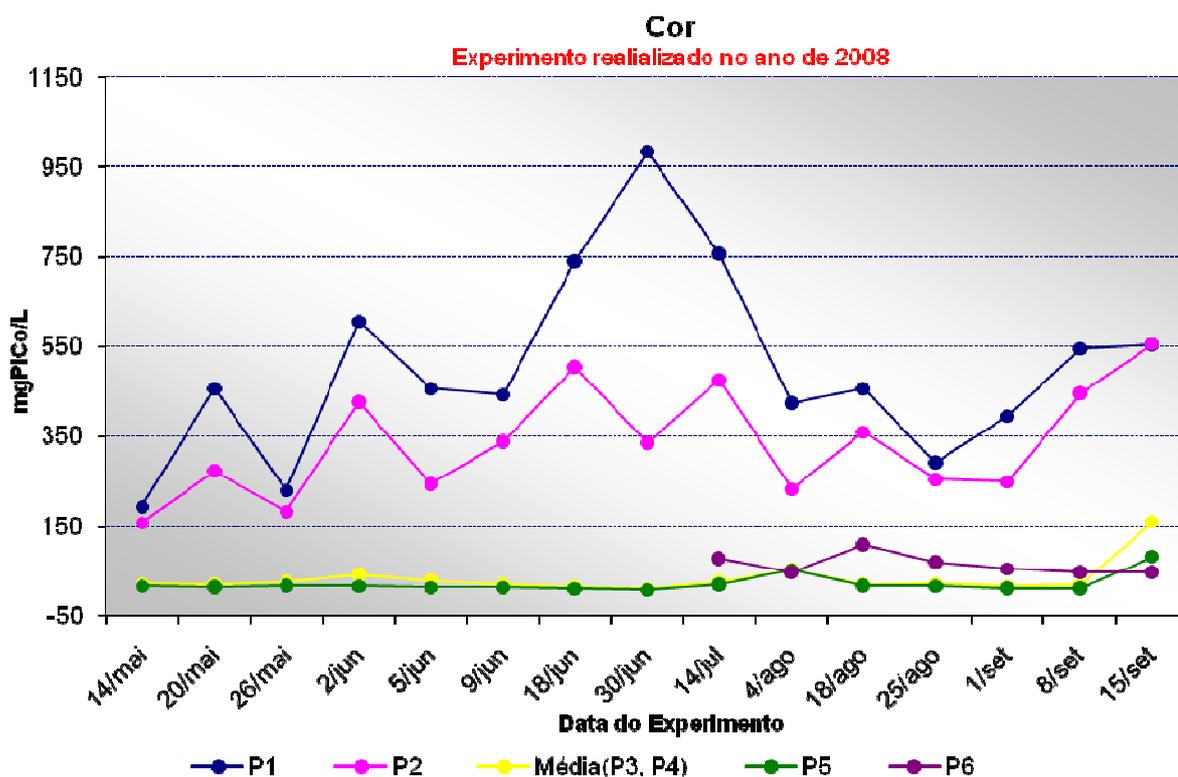
Esses valores médios, bem como a maioria dos ensaios, atenderam a qualidade mínima exigida pela USEPA (1992), quanto a valores de turbidez, para reúso urbano restrito, reúso urbano irrestrito, e reúso agrícola de culturas alimentícias se mantendo inferiores a 2 NTU (Tabela 3.3). Ressalta-se, entretanto, que os ensaios que não atenderam a essa exigência estiveram associados às turbulências da ETE em funcionamento na EAV.

Essa elevada remoção indica a potencialidade desse sistema sequencial (híbrido) na remoção de turbidez, fato já destacado por vários autores, dentre eles Sezerino (2006), que já reforçava a tese da aplicação desse tipo de sistema como unidade de polimento de efluentes.

Verificou-se diferença estatisticamente significativa quando da aplicação do teste ANOVA, entre o afluente da etapa preliminar e o efluente do LCFH para Turbidez. Entretanto, com relação ao efluente de cada leitos, não se verificou diferença significativa entre eles. Sendo que, todos possuíam valores abaixo do limite máximo exigido para corpos de água de classe 1 (CONAMA nº 357 de 2005), que é de 40 NTU (Tabela3.7). Deste modo, garantem-se condições, quanto a este parâmetro, para uso do efluente na recreação de contato primário e na irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, além da aquicultura e da pesca.

### **Cor**

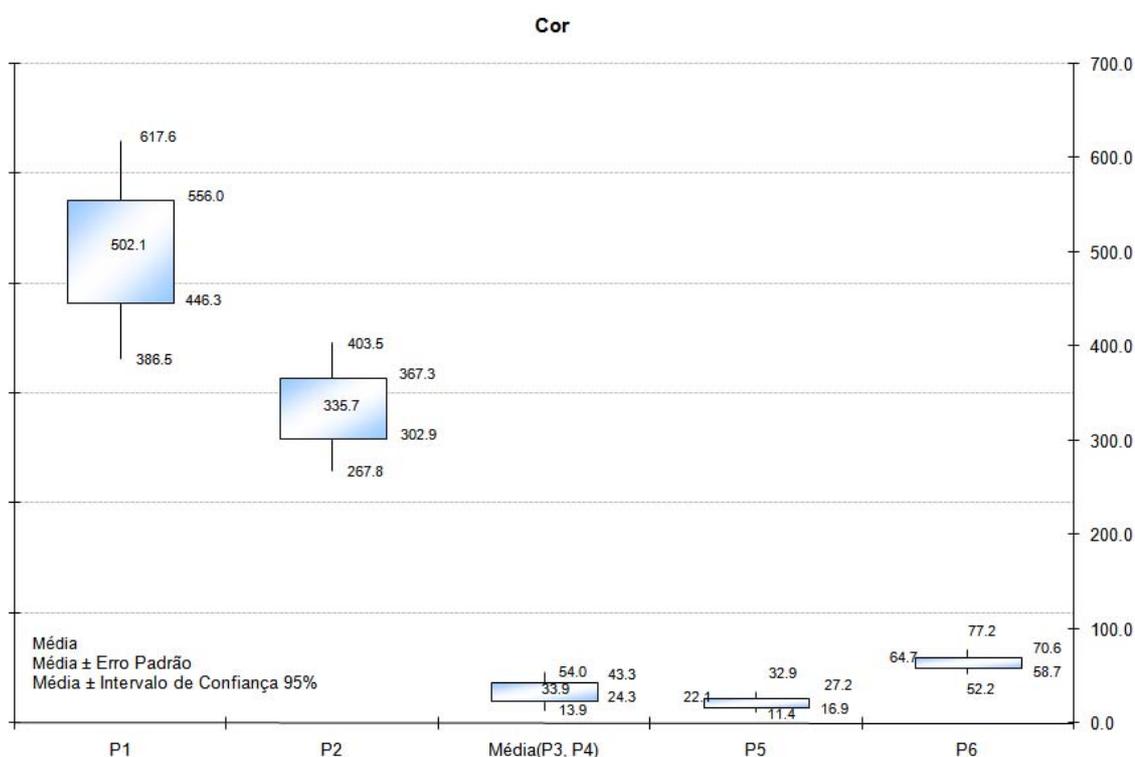
Para esse parâmetro o sistema teve um delineamento semelhante ao da Turbidez, apresentando picos nos mesmos períodos, bem como altos níveis de remoção, conforme apresenta o gráfico da Figura 45, denotando estabilidade de funcionamento dos LC com respeito a esse parâmetro. Essa semelhança de perfil denota que as variações ocorreram, também, pelos mesmos fatores.



**Figura 45.** Comportamento evolutivo de Cor no Sistema Experimental

No Canal de Cloração observou-se um aumento nos valores desse parâmetro para todas as amostragens, com exceção da última. O início da avaliação nessa unidade deu-se em 14/julho, e os valores se mantiveram sempre acima dos valores obtidos no efluente dos leitos, com exceção da última semana. Pelo gráfico da Figura 45 observa-se que nessa amostra houve uma inversão; no Canal de Cloração o valor foi mais baixo em relação aos leitos. O aumento de cor era percebido alguns minutos após a aplicação do hipoclorito. Ressalta-se que essa amostra foi coletada no terceiro dia da ocorrência do maior evento ao longo da pesquisa, no qual esteve presente uma população de 5500 pessoas e que durou 9 dias. No primeiro dia após o término do evento, fez-se nova coleta, e, apesar do efluente não ter sido avaliado para esse parâmetro, foi perceptível que o efluente não apresentou a cor esverdeada levemente das semanas anteriores. Provavelmente ocorreu a reação do cloro com algum composto contido na água, mas não foi possível efetuar a avaliação.

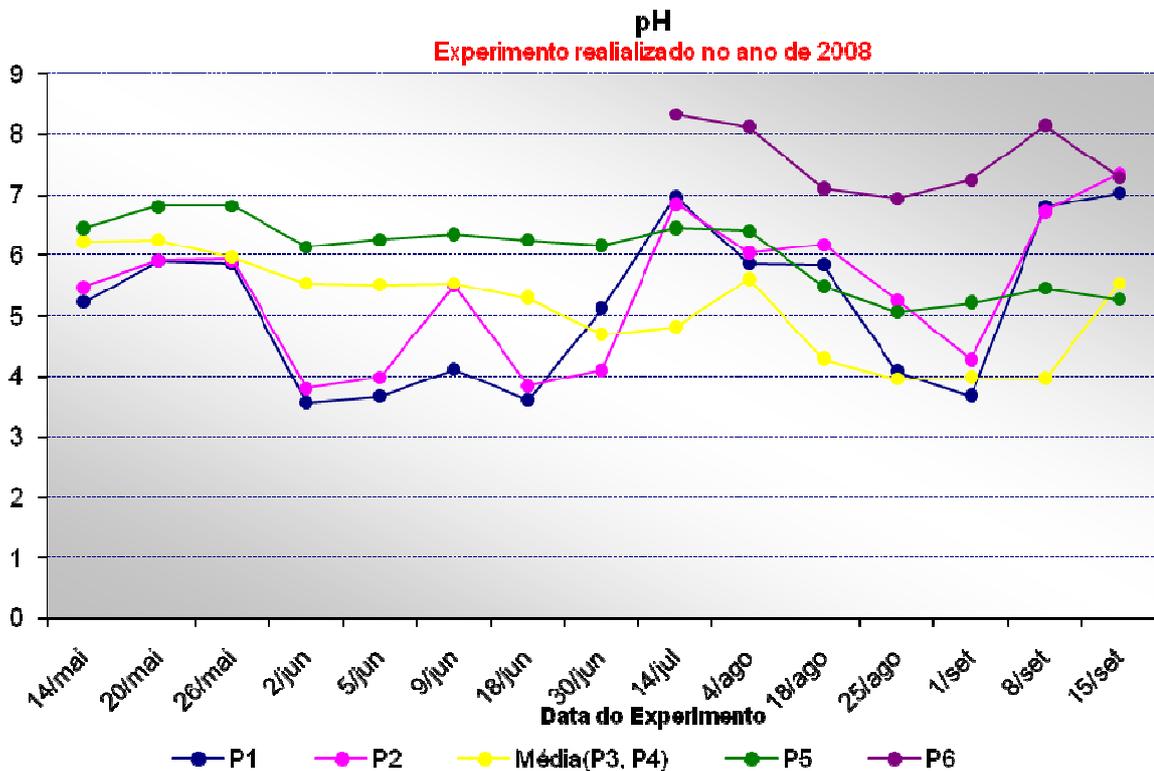
No gráfico do tipo *Box-plot* da Figura 46, observa-se médias de concentração da Cor nas unidades do Sistema Experimental. Houve um decaimento expressivo ao longo das unidades, tendo-se concentrações média afluente e efluente de  $367,3 \pm 302,9 \text{ mgPtCoL}^{-1}$  e  $43,3 \pm 24,3 \text{ mgPtCoL}^{-1}$  nos LCFVs;  $43,3 \pm 24,3$  e  $27,2 \pm 16,9 \text{ mgPtCoL}^{-1}$  no LCFH. Assim como na Turbidez, verificou-se diferença significativa estatisticamente, quando da aplicação do teste ANOVA, entre o afluente da etapa preliminar e o efluente do LCFH para o parâmetro Cor. Entretanto, com relação aos leitos, não se verificou diferença significativa entre eles.



**Figura 46.** Gráfico tipo *boxplot*, destacando os valores referentes a Cor (média, desvio padrão, 3 vezes o desvio padrão) obtidos com o monitoramento do Sistema Experimental ao longo de 07 meses.

## pH

No período de 14/maio a 30/junho, o sistema demonstrou certa linearidade, conforme apresenta a Figura 47. No LCFH os valores de pH se mantiveram na ordem de 6,82 a 6,17, já nos LCFVs os valores foram mais baixos e a faixa mais oscilante, na ordem de 6,25 a 4,6. Esse período de amostragem foi onde se teve a mais longa uniformidade da população da EAV, período em que foi mantida praticamente uma população fixa de 500 pessoas. Apesar dos baixos valores de pH nos leitos verticais, esse foi o período de maior estabilidade do efluente quanto a esse parâmetro.



**Figura 47.** Comportamento evolutivo de pH no Sistema Experimental

Nos LCFVs a partir da 3ª amostragem observa-se uma queda no pH, chegando a valores inferiores a 4 em amostragens posteriores. Essa queda pode ser em consequência da ocorrência da nitrificação nesses leitos, pois nesse processo ocorre a liberação de  $H^+$ , que consome a

alcalinidade do meio e possivelmente reduz o pH. Ressalta-se que ao serem atingidos valores de pH muito abaixo de 6,5, mínimo estimado para a ocorrência da nitrificação por USEPA (1993), Surampalli *et al.*(1997) e Metcalf e Eddy (2003), pode haver a inibição dos microorganismos nitrificantes, o que pode acarretar o aumento das concentrações de Nitrogênio Total Kjeldahl. Para Philippi e Sezerino (2004) a faixa ótima de pH para a ocorrência da nitrificação varia de 7,5 a 8,5. Abaixo desse faixa, tem-se rápida diminuição desse fenômeno.

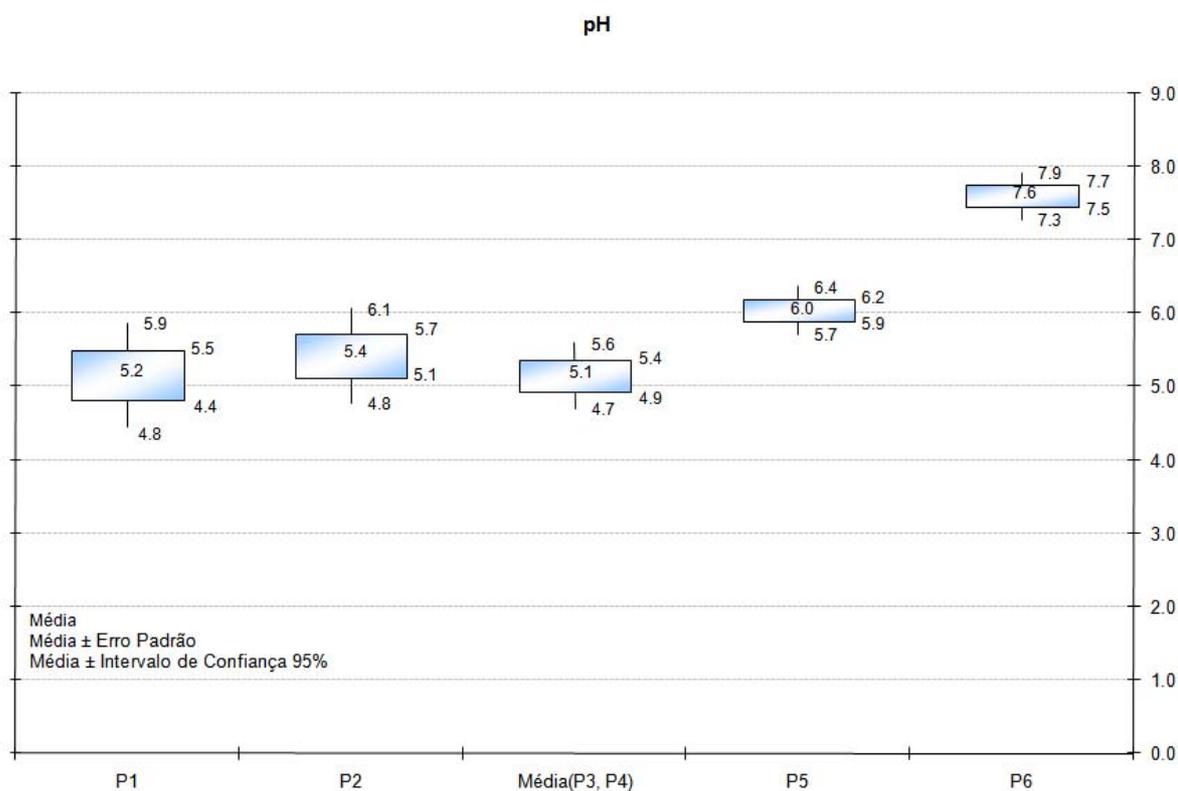
A amostra de 08/setembro apresentou o menor valor de pH nos LCFVs, fato justificado pela maior concentração populacional na EAV durante a pesquisa. A ETE em funcionamento da área de pesquisa oferecia um efluente com altos índices de amônia, como poderá ser visto no gráfico referente ao N-amoniaco. Como nesses leitos os índices de oxigênio são altos, a oxidação da amônia (nitrificação) pode ter demandado a alcalinidade do meio e assim favorecido a queda do pH.

No LCFH os valores de pH tiveram um aumento, mantendo-se entre 6,17 e 6,41 (Figura 47) no período de 30/jun a 4/agosto. Nas amostragens subsequentes houve queda, mantendo-se na ordem de 6,41 a 5. Esperava-se valores de pH mais altos nesse leito. Assim, pressupõe-se que ocorreu nesse leito uma parcial nitrificação em consequência de arraste de nitrogênio e amônia dos LCFVs para essa unidade, favorecendo as baixas de pH.

Os índices mais elevados de pH foram alcançados no efluente do Canal de Cloração após a desinfecção com hipoclorito de sódio, conforme indica o gráfico da Figura 47. Vale ressaltar que nessa unidade, também, foram alcançados os maiores índices de nitrato, denotando quantidades de amônia passando do LCFH para essa unidade.

No gráfico tipo *Box-plot* da Figura 48 observa-se os valores médios de pH, a média e desvio padrão e o intervalo de 95% de confiança para todas as unidades ao longo da pesquisa.

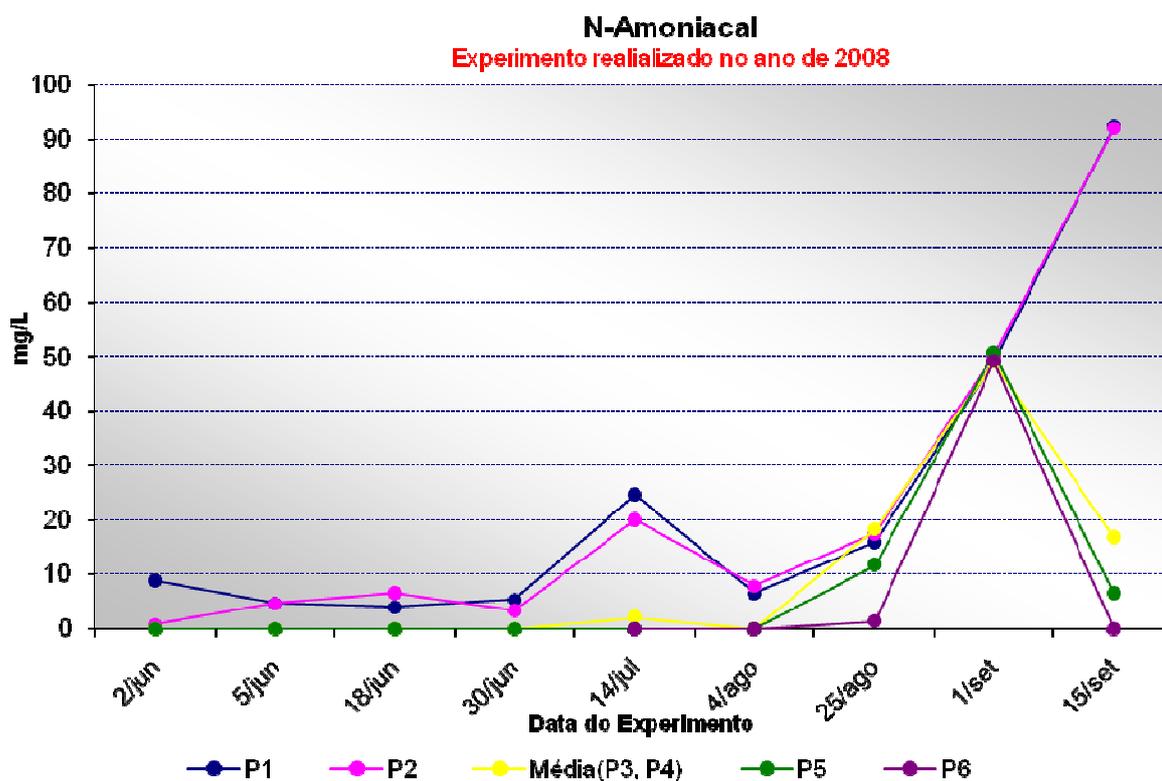
Não se verificou diferença significativa estatisticamente, quando da aplicação do teste ANOVA, entre os efluentes de todas as unidades do sistema para o pH.



**Figura 48.** Gráfico tipo *boxplot*, destacando os valores de pH (média, desvio padrão, 3 vezes o desvio padrão) obtidos com o monitoramento do Sistema Experimental ao longo de 06 meses.

### N-amoniaco

O comportamento do nitrogênio amoniacal no Sistema Experimental ao longo do período avaliado (Figura 49) revela uma ampla variação nas concentrações efluentes da ETE em funcionamento. Essas variações foram perceptivas no decorrer da flutuação populacional na área. As amostragens de 14/jul, 1/set e 15/set ressaltaram os maiores índices alcançados devido às maiores concentrações de pessoas.



**Figura 49.** Comportamento evolutivo de N-amoniaco no Sistema Experimental

Observa-se certa estabilidade do sistema entre 02/jun e 30/jun, período em que houve pouca turbulência devido à baixa flutuação populacional na área, entretanto, é perceptivo um aumento de N-amoniaco entre 30/jun e 4/ago, com o ponto mais elevado em 14/jul. Isso se deve à grande quantidade de esgoto gerada nesse período com o agravante da parada de um aerador. No ponto mais elevado desse intervalo, 14/jul, estava ocorrendo um evento com população variando entre 2000 a 2300 pessoas, com uma duração de 9 dias. No intervalo de estabilidade, tanto os leitos verticais quanto o horizontal não apresentaram amônia, denotando uma assimilação por parte do sistema. Na amostra de 14/jul já se evidenciou acréscimo nos índices de nitrogênio amoniaco no efluente dos leitos verticais. Observou-se um crescimento em todos os leitos a partir de 4/ago até 1/set associado à seqüência de eventos ocorridos na área, tendo o seu ápice com uma população de 5500 pessoas ao longo de 9 dias, com o término em 14/set. Os leitos, verticais e horizontal, posteriormente a 01/set, apresentaram uma forte queda nas concentrações de amônia, em detrimento das concentrações crescentes no efluente da ETE da

área, até alcançar o maior pico em 14/set. A queda desses índices, retrata a nitrificação nos verticais, bem como, a assimilação da macrófita em sua biomassa ocorrida nesses leitos.

Na amostra de 15/setembro, o efluente do Canal de Cloração (P<sub>6</sub>) apresentou uma queda expressiva nos índices de amônia, chegando a zerar. Atribui-se isso à ocorrência da nitrificação que foi favorecida pelas quantidades de oxigênio nessa unidade, bem como, pela subida do pH devido à cloração do efluente. Sendo essa, portanto, a razão dos altos índices de nitrato alcançados no efluente dessa unidade. Mas, como apresenta o gráfico da Figura 50, em valores médios, o efluente dessa unidade ainda apresenta 31,43% de acréscimo de nitrogênio amoniacal em relação ao LCFH. Esse acréscimo pode estar associado a alguma parcela de contribuição de nitrogênio amoniacal vinda dos leitos verticais e que não encontrou condições de nitrificação no leito horizontal passando para a unidade subsequente. Esse fato era perceptível quando da ocorrência de eventos que se prolongavam ao longo da semana, sem interrupções. Nessas condições havia uma alteração em todos os parâmetros, inclusive, na própria macrófita, que apresentava tendência de amarelamento das folhas, aparentando certa intoxicação. Pode ter havido, também, alguma contribuição de nitrogênio orgânico em consequência das turbulências da ETE em funcionamento, à flutuação populacional e das folhas que caíam no leito ou mesmo das raízes que se rompiam.

É importante ressaltar que as macrófitas tiveram seu melhor desempenho nas primeiras semanas subsequentes aos maiores eventos. Isso se deve à desintoxicação das plantas, bem como, ao grande aporte de nutrientes devido à conversão da carga de nitrogênio amoniacal contida no sistema à forma de nitrato, que é uma forma assimilável pelas plantas.

Segundo Philippi e Sezerino (2004), a maioria dos trabalhos tem reportado a nitrificação nos sistemas de fluxo vertical como polimento de efluentes domésticos. Feld e Kunst (1997) obtiveram 90% de remoção de NH<sub>4</sub>-N e atribuíram esta remoção a oxidação desta amônia a nitrato. Kantawanichkul *et al.* (2000) utilizou um *wetland* construído de escoamento subsuperficial de fluxo vertical como polimento de efluentes da suinocultura, e verificaram num estudo em escala piloto, porcentagens de transformação de amônia para nitrato de 45% e 64% para cargas aplicadas de 6,22g NH<sub>3</sub>-N.m<sup>2</sup>.d<sup>-1</sup> e 9,52g NH<sub>3</sub>-N.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, respectivamente.

No Brasil, os filtros plantados com macrófitas de fluxo vertical avaliados por Sezerino (2006), alcançaram índices de remoção de 73% de NH<sub>4</sub>-N quando submetidos a uma taxa de

230,74 mm.d<sup>-1</sup> (250Lm<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>), sendo traduzidos pelo pesquisador como uma efetiva ocorrência de nitrificação. Esses filtros (com meio filtrante composto de 0,05m de brita1, 0,60m de areia e 0,10m de brita 1e com área superficial de 2,57m<sup>2</sup>) se assemelhavam aos Leitos Cultivados com Macrófitas de Fluxo Vertical avaliados nesse trabalho (com meio filtrante composto de 0,07m de brita 01, 0,60m de areia e 0,13m de brita 1 e com área superficial de 2,75m<sup>2</sup>), sendo que Sezerino utilizou efluente de suinocultura com tratamento secundário em lagoa anaeróbia, e o efluente utilizado no presente estudo era doméstico vindo de um sistema de lodo ativado, ressaltando que durante a avaliação a ETE da área de pesquisa passava por turbulências operacionais que influenciaram na qualidade do efluente do Sistema Experimental.

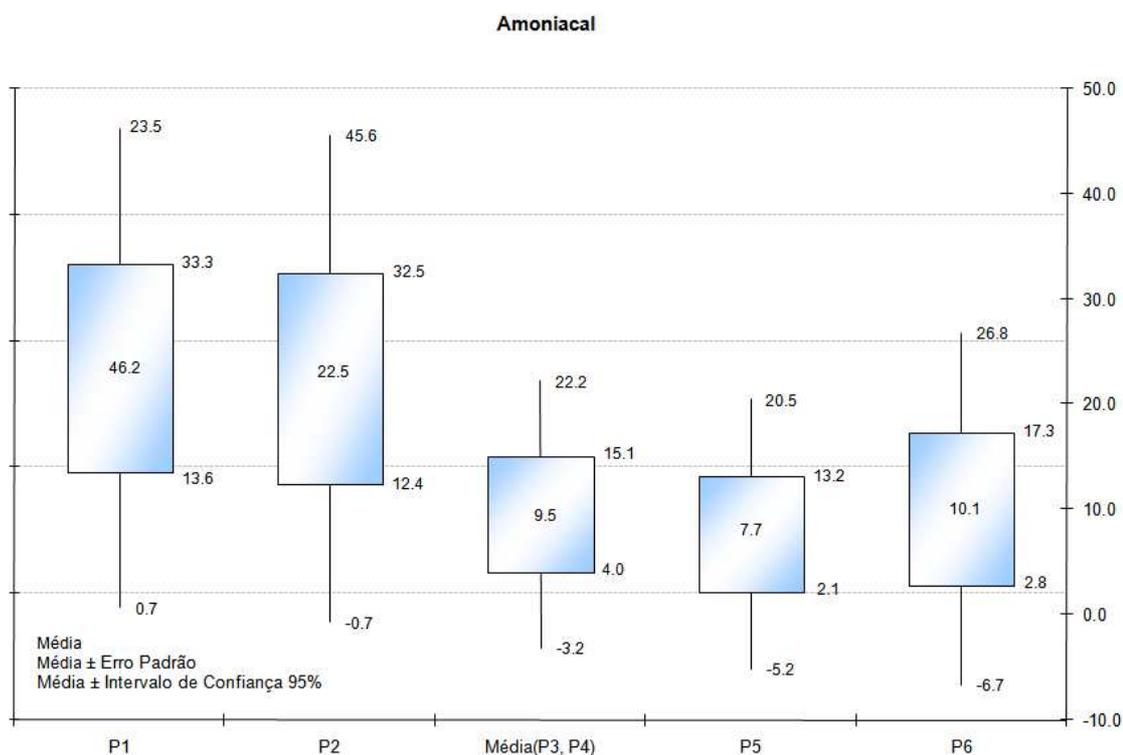
Os LCFVs avaliados nesse estudo, apesar das turbulências da ETE em funcionamento, alcançaram índices de remoção de N-amoniaco de 57,8%, submetido a uma carga de 22,5mgL<sup>-1</sup> (Figura 50), considerados dentro da média obtida pelos referidos autores. Ressalta-se que a nitrificação nesses leitos foi fortemente prejudicada pelas baixas de pH, que se mantiveram variando entre 6,25 e 3,96, gráfico da Figura 47. O que é justificado pela afirmação dos pesquisadores Downing (1978 *apud* Von Sperling 1997), ao ressaltarem que a taxa de nitrificação apresenta-se no seu ótimo e aproximadamente constante na faixa de pH de 7,2 a 8,0.

O efluente final do LCFH comparativamente ao efluente da ETE em funcionamento na EAV, teve um decréscimo médio nas concentrações de nitrogênio amoniacal de 46,2mgL<sup>-1</sup> para 7,7mgL<sup>-1</sup>, com eficiência correspondente a 83%. Essas concentrações atendem aos padrões de qualidade para lançamento em corpos d'água classe 3 (CONAMA n° 357), que preconiza valores de N-amoniaco = 13,3; pH ≤ 7,5.

No LCFH a eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal foi baixa, apresentando valor médio de 19% com concentrações afluente 9,5mgL<sup>-1</sup> e efluente 7,7mgL<sup>-1</sup> (Figura 50). Ressalta-se, entretanto, que a nitrificação não é considerada como objetivo principal desse leito, e sim, a denitrificação, uma vez que na maior parte do tempo, o material filtrante, bem como a rizosfera, permanecem inundados com o efluente aplicado. Esta inundação impede a entrada de O<sub>2</sub> atmosférico na massa líquida, tornando o ambiente anóxico, propício para a ocorrência do processo.

Entretanto, o percentual de remoção de nitrogênio amoniacal no LCFH, aponta para a continuidade da nitrificação, indicando arraste de oxigênio e de amônia dos LCFVs para essa unidade.

A Tabela 5.2 apresenta as concentrações, afluentes e efluentes, e a eficiência em termos de percentuais de remoção no Sistema Experimental.



**Figura 50.** Gráfico tipo *boxplot* destacando os valores de N-amoniacal (média, desvio padrão, 3 vezes o desvio padrão) obtidos com o monitoramento do Sistema Experimental ao longo de 07 meses.

## N-Nitrato

Na Figura 51 pode ser observado que na primeira semana o sistema recebeu uma grande quantidade de nitrato vinda da ETE em funcionamento e que, grande parte dessa concentração foi assimilada pelo sistema. A partir da terceira semana, o sistema já apresenta uma produção de nitrato, prosseguindo até haver uma queda entre 30/jun e 14/jul devido à parada de um aerador e da ocorrência de uma seqüência de eventos variando entre 2000 a 2300. De 14/jul a 4/ago ocorreu nitrificação em todas as unidades, continuando até 25/set. Após essa data, todas as unidades apresentaram queda, com exceção do LCFH. No Canal de Cloração foi onde ocorreram os maiores índices de nitrificação (P<sub>6</sub>).

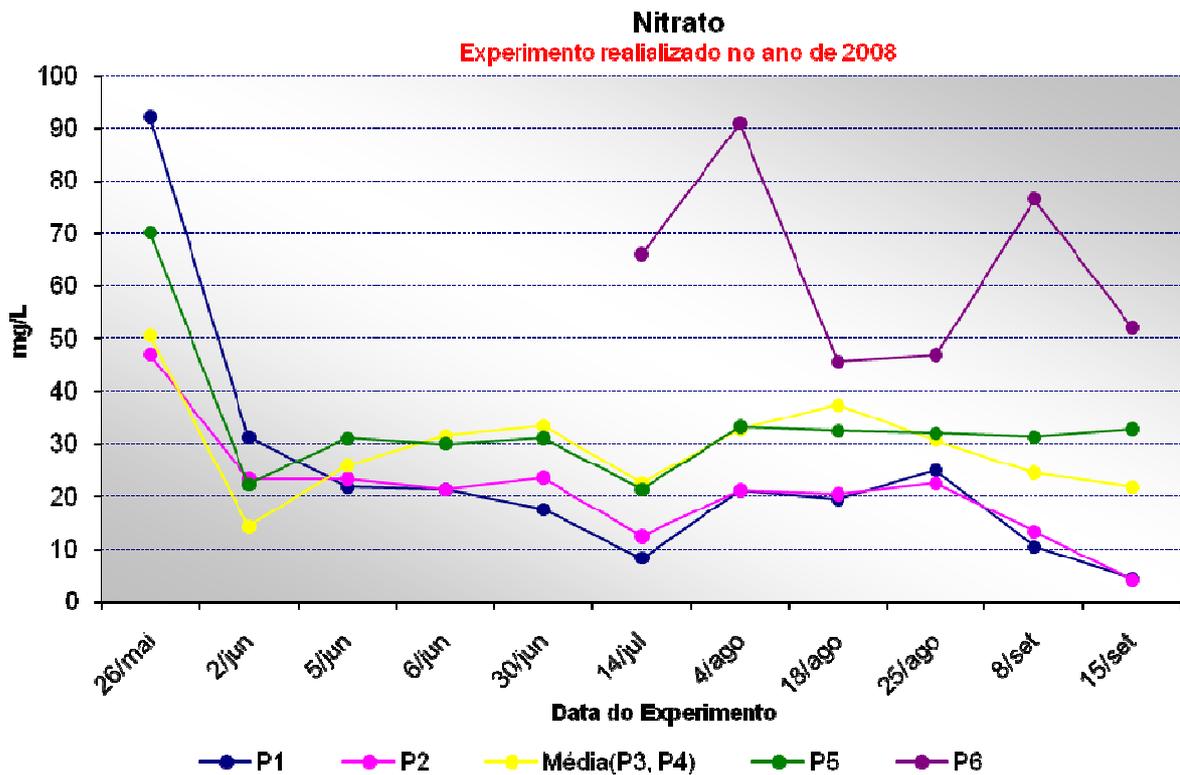


Figura 51. Comportamento evolutivo de N-Nitrato no Sistema Experimental ao longo de 07 meses

A remoção de nitrogênio amoniacal e produção de nitrato nos LCFVs (57,8% com concentrações média afluente  $22,5\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$  e efluente  $9,5\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$ ; 40% com concentrações média afluente  $21,1\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$  e efluente  $29,5\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$ , respectivamente) reforçam a hipótese da transferência de oxigênio no maciço filtrante, devido principalmente ao regime intermitente de alimentação e as características do material filtrante, assim como da adaptação das bactérias nitrificantes junto ao biofilme formado na rizosfera. A potencialidade de nitrificação nos LCFVs, com 0,60m de areia, pode ser atribuída, também, ao fenômeno de adsorção junto ao material filtrante (COOPER *at al.*, 1996; KADLEC e KNIGHT, 1996).

Mesmo que este percentual de remoção não se mostre como ideal, pois um dos objetivos dos *wetlands* de fluxo vertical é promover a nitrificação por completo, mas quando se compara estes resultados com aqueles descritos na literatura especializada, a qual recomenda uma carga máxima de  $6,5\text{gNTK}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ , (PLATZER, 1999) em sistemas tipo *wetlands*, verifica-se uma potencialidade nos leitos estudados direcionados à nitrificação. Ressalta-se ainda, que mesmo com elevada concentração de carbono no afluente (concentração média  $123,7 \pm 105,6 \text{mgL}^{-1}$ ), potencial consumidor de oxigênio, e uma entrada na massa filtrante somente pela convecção e difusão atmosférica e raízes das plantas, obteve-se uma nitrificação elevada comparando com outros trabalhos. Por exemplo, Philippi e Sezerino (2004) avaliaram *wetlands* de fluxo vertical com meio filtrante de areia, cuja media de remoção da amônia esteve em torno dos 49%, sendo que destes, 42% foram transformados a nitrato.

Um fato importante que vale ressaltar é que as duas formas de nitrogênio geralmente utilizadas pelas macrófitas são a amônia e o nitrato. Porém, a amônia por ser mais reduzida energeticamente do que o nitrato torna-se a fonte preferencial. Entretanto, em ambientes onde o nitrato é predominante este será, então a maior fonte de nitrogênio inorgânico passível de ser assimilado, (KADLEC e KNIGHT, 1996).

As macrófitas utilizam enzimas (nitrato redutase e nitrito redutase) para converter o nitrogênio oxidado às formas usuais. Porém, a produção destas enzimas diminui quando o nitrogênio amoniacal está presente, (KADLEC e KNIGHT, 1996 *apud* PHILIPPI e SEZERINO, 2004). Este processo é relevante em ambientes onde se tem nitrato e amônia em concentrações elevadas, pois a assimilação pela planta poderá ser inibida e o nitrato não ser assimilado. Sendo assim, a presença de amônia no LCFH, pode ter inibido a assimilação do nitrato pela planta, justificando o aumento dos índices de nitrato no efluente desse leito.

Esse fenômeno foi bastante perceptível nos momentos quando ocorreram os dois eventos mais longos (2800 pessoas e 5500 pessoas), ambos com duração de nove dias ininterruptos, quando foram observados as maiores quedas do pH e aumento dos índices de amônia em todas as unidades, provocando certo amarelamento das macrófitas nos três leitos. Ao longo desses eventos, as condições de pH eram baixas nos LCFVs, portanto, desfavoráveis à ocorrência da nitrificação, o que pode ter levado à sua inibição com conseqüente acúmulo da amônia. Esse fenômeno, também foi refletido nas macrófitas, que, ao longo desses eventos apresentaram certo amarelamento e ressecamento das folhas em todos os leitos, mais intensamente, nos verticais. Nas primeiras semanas subseqüentes a esses eventos, as macrófitas passaram a ter seu melhor desempenho, aumentando a intensidade do verde das folhas bem como a multiplicação do número de plantas, denotando desintoxicação, e o aporte de nutrientes.

Um aspecto relevante, e que mereceu destaque foi o aumento da  $DBO_5$  no LCFH, comparativamente aos LCFVs. A  $DBO_5$  retrata a quantidade de oxigênio requerida para estabilizar, através de processos bioquímicos, a matéria orgânica carbonácea. Assim, como nesse leito, a matéria orgânica já se encontrava em franca estabilização, entende-se que ocorreu uma nitrificação durante o teste, e por conseqüência houve aumento da  $DBO_5$ , como é apresentado por Metcalf e Eddy (1991). Índices de amônia e de oxigênio podem ter sido arrastados dos LCFVs para o leito horizontal favorecendo a continuidade da nitrificação nessa unidade.

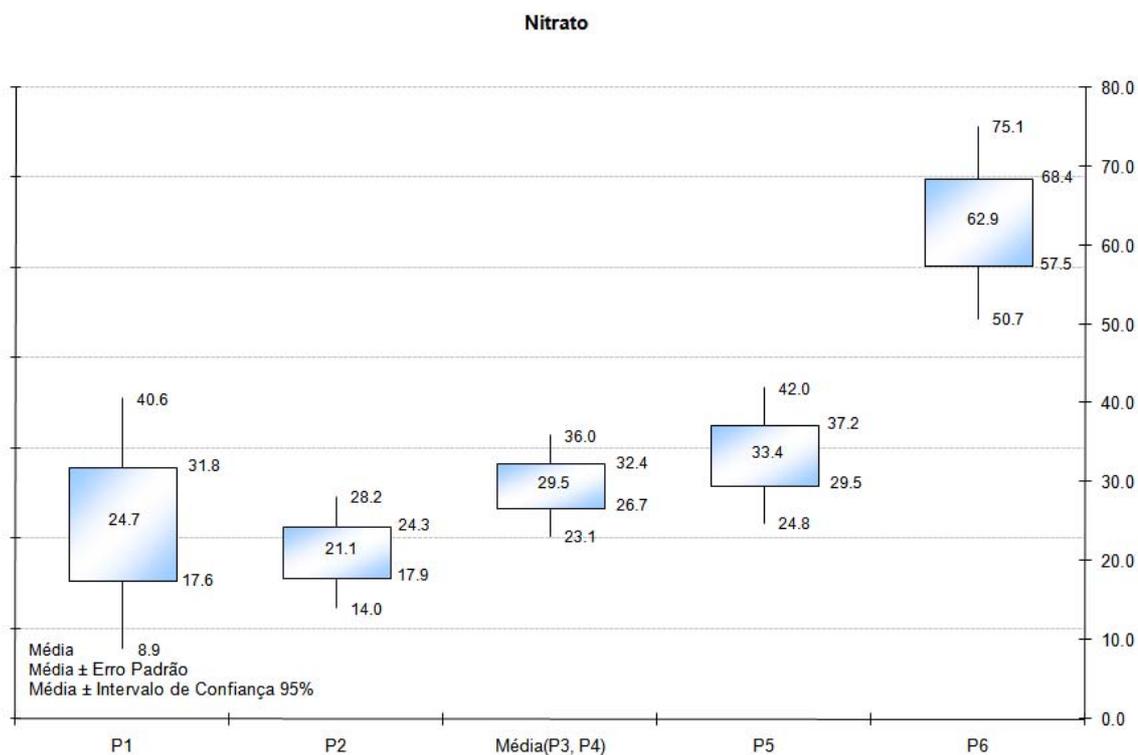
No LCFH ainda houve remoção de nitrogênio amoniacal, 19% e acréscimo de nitrato, 13% (Tabela 5.2). Dado o aumento de nitrato no LCFH, entende-se que a denitrificação não ocorreu nessa unidade, pelo menos efetivamente. O efluente desse leito continha concentrações de nitrato consideráveis, em média de  $33,4\text{mgL}^{-1}$  não atendendo aos padrões de qualidade para lançamento em águas superficiais classe 1, 2, 3 estabelecidos pelo CONAMA nº 357, pois o valor máximo estipulado por essa legislação é de  $10\text{mgL}^{-1}$ . O valor obtido no leito reporta para o lançamento em corpos d'água classe 4. Assim, os resultados remetem para a necessidade de LCFH maiores, onde se pode ter maiores TDH, ou a inserção de uma ou duas unidades nas mesmas dimensões das que foram estudadas, utilizando-as em série, com vistas a aumentar as possibilidades de ocorrer uma efetiva denitrificação.

Comparativamente aos resultados obtidos na água de reúso do Projeto São Caetano,  $20,5\text{mgL}^{-1}$  de nitrato, o valor médio da concentração de nitrato encontrado no LCFH se manteve superior,  $33,4\text{mgL}^{-1}$ .

No Canal de Cloração, a nitrificação foi elevada, 88% comparativamente ao leito horizontal, indicando que quantidades de amônia passaram do LCFH para essa unidade. Isso pode estar associado às baixas de pH nos leitos verticais com a inibição da nitrificação nesses leitos, e na seqüência, quantidades de amônia podem ter sido varridas para o LCFH, que, devido à condição anóxica desse leito, a maior parte da carga pode ter passado para o Canal de Cloração. Os altos índices de nitrificação nesse canal se justificam pelas condições favoráveis à ocorrência do processo, pois nessa unidade há acréscimo de oxigênio devido às turbulências provocadas para homogeneização do cloro na lâmina líquida e elevação dos valores de pH devido a adição do hipoclorito. Ressalta-se, entretanto, que o efluente desse canal, representado pelo P<sub>6</sub>, não é tão representativo, sendo considerado um ponto frágil, em consequência das poucas análises realizadas nesse ponto.

Apesar de não terem sido avaliadas as concentrações de Nitrogênio Orgânico, supõe-se que possa ter havido também alguma contribuição dessa forma de nitrogênio, tendo em vista as turbulências operacionais da ETE em funcionamento na área, que levaram à produção de um efluente que não atendia aos requisitos de qualidade propostos pela concepção de um sistema de lodo ativado.

O gráfico tipo *Boxplot* da Figura 52 mostra a evolução do nitrato, ressaltando a Média, Média  $\pm$  Erro Padrão, Média  $\pm$  Intervalo de Confiança 95% em cada ponto ao longo das semanas. Não se verificou diferença significativa estatisticamente, quando da aplicação do teste ANOVA, entre os efluentes das unidades do sistema para nitrato.

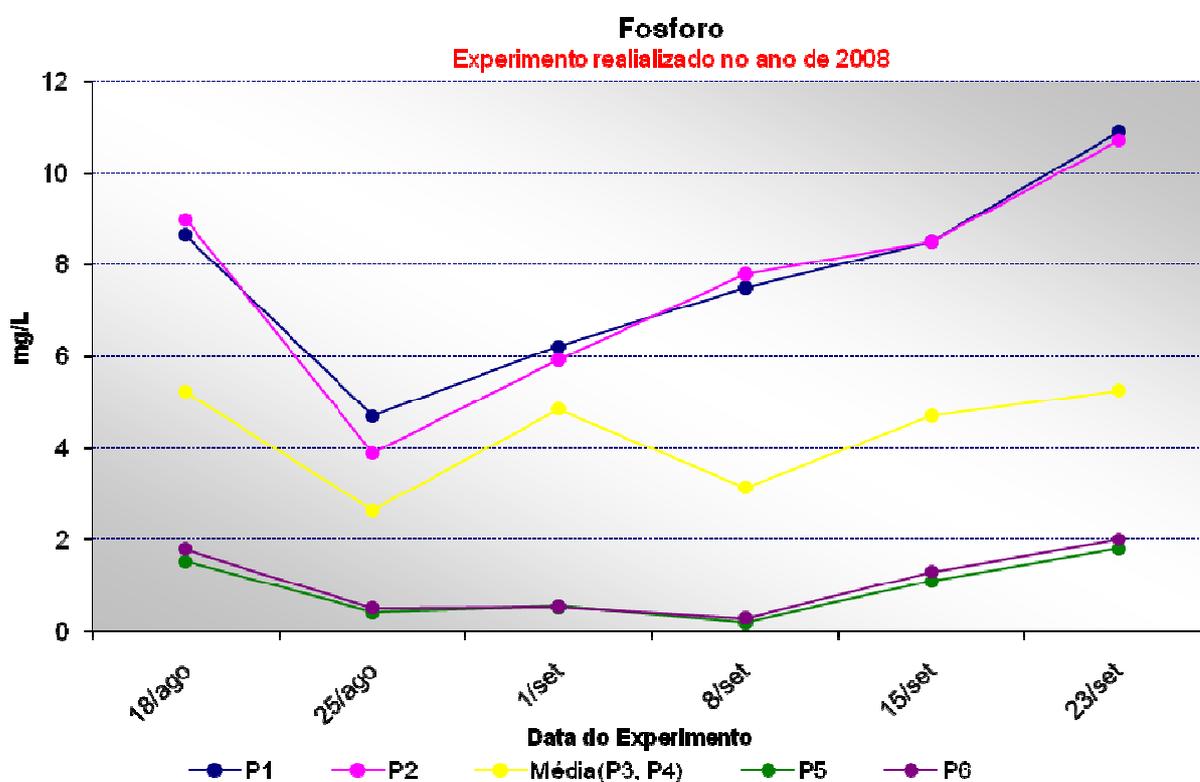


**Figura 52.** Gráfico tipo *boxplot*, destacando os valores de N-Nitrato (média, desvio padrão e 3 vezes o desvio padrão) obtidos com o monitoramento do Sistema Experimental ao longo de 07 meses.

### Fósforo Total

O fósforo – P é um macronutriente essencial para o crescimento de plantas. O sistema apresentou uma remoção de fósforo crescente em todas as unidades e ao longo do tempo. A avaliação ocorreu quando as macrófitas já estavam totalmente estabelecidas. No período de 18/agosto a 25/agosto houve uma redução nas concentrações de fósforo em todas as unidades, talvez pela redução considerável na população de uso da área, de 1800 pessoas para 500 pessoas. A partir desse período houve um crescimento em todas as semanas devido aos grandes eventos ao longo dessas semanas, inclusive, o maior deles teve durabilidade de 9 dias, e contou com 5500 pessoas. Contudo, o sistema apresentou consideráveis, 43% nos LCFVs, 79% no LCFH em relação aos verticais e remoção global de 88% no Sistema Híbrido.

As maiores fontes de fósforo nas águas residuárias são provenientes das excretas humanas ou animais, de detergentes ou outros produtos sintéticos e de elementos químicos utilizados no tratamento de água potável. Ressalta-se que com exceção dos animais, o esgoto da EAV recebe contribuição de todas as fontes referidas, especialmente no período de grandes eventos. No período de 01/setembro a 25/setembro foram muito freqüentes as lavagens de alojamentos, com aproximadamente 5500 leitos, restaurantes e cozinha, além dos banheiros de um auditório com capacidade para 10000 pessoas. Nesse período, portanto, houve uma contribuição de fósforo considerável, entretanto, o sistema respondeu bem, apresentando linearidade no desempenho conforme apresenta o gráfico da Figura 53.



**Figura 53.** Comportamento evolutivo de Fósforo Total – P no Sistema Experimental ao longo de 02 meses

Nos *wetlands* construídos os mecanismos de retenção de fósforo contido nas águas residuárias incluem processos físicos, químicos e biológicos, envolvendo fenômenos de precipitação, sedimentação e, principalmente, adsorção. Já o relevante mecanismo de remoção é a

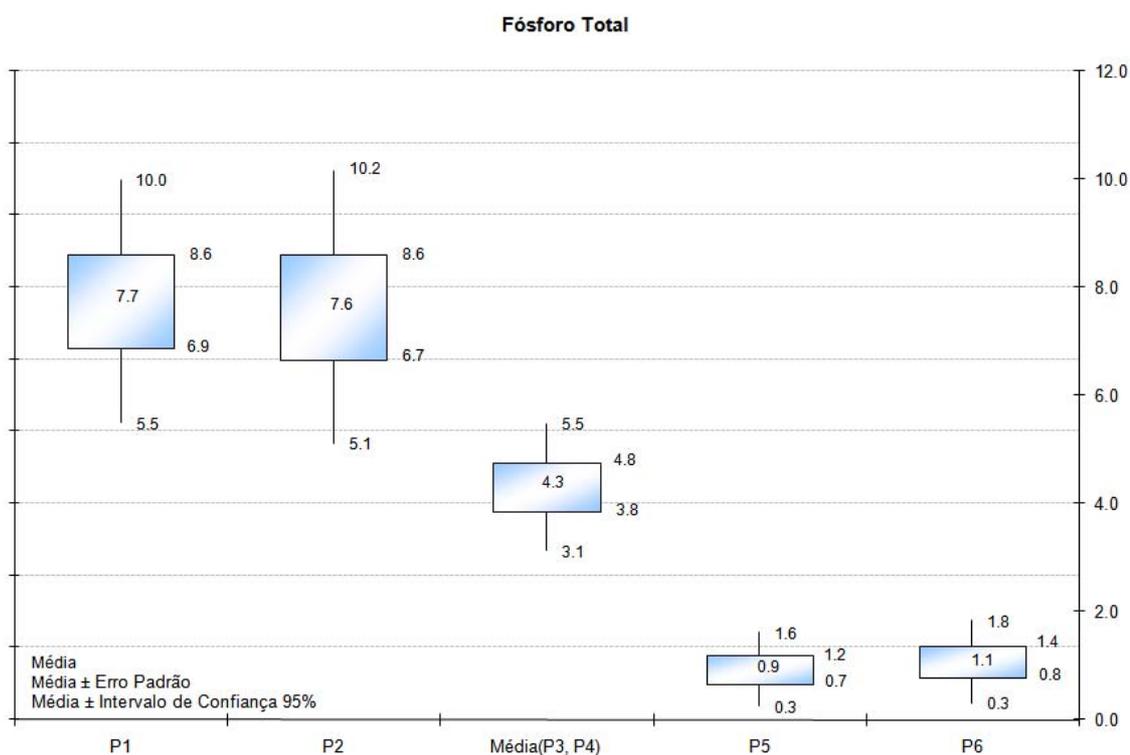
incorporação deste fósforo na biomassa das macrófitas e a poda regular subsequente, conforme afirmado pelos pesquisadores (Kadlec e Knight, 1996; Arias *et al.*, 2001). Ressalta-se, portanto, que vários mecanismos podem ter ocorrido, inclusive, um fenômeno bastante perceptível no presente estudo foi a incorporação do fósforo na biomassa das macrófitas, dado sua desenvoltura, principalmente, nos períodos em que a EAV recebia grande número de pessoas, mais perceptível ainda, na semana subsequente aos grandes eventos, denotando o aporte de nutrientes. Foram alcançados índices consideráveis de remoção de fósforo em todos os leitos. Atribui-se esse desempenho ao fato das macrófitas ainda estarem em desenvolvimento, e parte delas, ao final das avaliações, em franco amadurecimento da floração.

Salati Filho *et al.* (2000) obtiveram eficiência de remoção de ortofosfato de 70% e para fósforo total de 67%, em uma unidade em escala piloto aplicada como tratamento terciário. Reddy *et al.* (2000), em seus estudos alcançaram faixas de remoção de fósforo variando entre 30% a 45%, sendo que a incorporação na biomassa das macrófitas fora cerca de  $35 \text{ Kg.ha}^{-1}$  (=  $3,5 \text{ g.m}^{-2}$ ). Hunt e Poach (2000) relacionaram vários trabalhos empregando *wetlands* construídos no polimento de dejetos de suínos e relataram percentuais de redução de fósforo total variando entre 44% e 76%.

Mais recentemente, Sezerino (2006), avaliando um Sistema Híbrido como pós-tratamento de lagoa anaeróbia que tratava esgoto de suínos, verificou em relação ao  $\text{PO}_4\text{-P}$ , uma dinâmica particular, tendo-se inicialmente remoções da concentração afluenta no Filtro Plantado com Macrófitas de Fluxo Horizontal, seguida de períodos de concentrações efluentes superiores às afluentes. Souza *et al.* (2001), verificaram brusco decaimento da eficiência de remoção do fósforo em *wetlands* horizontais após o oitavo mês de operação.

No presente estudo, somente após 5 meses de operação é que foram iniciadas as avaliações do fósforo. O comportamento observado por Souza *et al.*, (2001) e Sezerino (2006) não foi observado nesse estudo, as remoções de fósforo continuaram crescentes até o sétimo mês, quando da finalização das avaliações. Não foi efetuada nenhuma poda ao longo da pesquisa, inclusive, ao final das avaliações as macrófitas ainda estavam em processo de franca floração, tendo continuidade por meses subsequentes, pois o replantio, especialmente nos leitos verticais, se deu gradativamente, conduzindo ao amadurecimento das plantas, também, gradativamente.

No gráfico tipo *Box-plot* da Figura 54 e na Tabela 5.2, estão representadas as médias de remoções e de concentrações. Nos LCFVs, 43% de remoção (concentrações afluentes e efluentes de  $8,6 \pm 6,7\text{mgL}^{-1}$  e  $4,8 \pm 3,8 \text{ mgL}^{-1}$  respectivamente), no LCFH, 79% de remoção (concentrações afluente e efluente de  $4,8 \pm 3,8 \text{ mgL}^{-1}$  e  $1,2 \pm 0,7 \text{ mgL}^{-1}$  respectivamente). Os valores médios das concentrações nos efluentes dos LCFVs e LCFH são  $4,3$  e  $0,9\text{mgL}^{-1}$ , respectivamente. Ressalta-se que o Sistema Híbrido alcançou um valor médio em seu efluente final de  $0,9\text{mgL}^{-1}$ , correspondendo a 88% de remoção, abaixo do valor observado para água de reúso em parque temático nas proximidades da cidade de São Paulo no período de dez/1999 a jul/2001, que foi  $1\text{mgL}^{-1}$  (Mancuso e Santos, 2003). Sendo assim, com respeito a esse parâmetro, o efluente atende aos requisitos de qualidade e tratamento requeridos para água de reúso em agricultura e paisagismo, segundo o “Titulo 22 do Código da Califórnia”. Entretanto, não atende aos padrões de qualidade para lançamento em águas superficiais Classes 1, 2 e 3 estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 357, que estabelece  $0,1\text{mgL}^{-1}$  para as Classes 1 e 2, e  $0,15\text{mgL}^{-1}$  para a Classe 3.



**Figura 54.** Gráfico tipo *boxplot*, destacando os valores de Fósforo Total - P (média, desvio padrão, 3 vezes o desvio padrão) obtidos com o monitoramento do Sistema Experimental ao longo de 07 meses.

A análise de variância ANOVA em relação às frações de fósforo no efluente de cada unidade revelou diferença estatística significativa em termos de Fósforo Total – P.

Em termos de eficiência, a seqüência tecnológica, conforme apresenta a Tabela 5.2, apresentou desempenho considerável em relação a todos os parâmetros, sendo mais acentuada para a remoção de DQO, Cor, Turbidez, SST, P, Nitrificação (conversão de N-amoniaco a Nitrato) e satisfatória para DBO<sub>5</sub>.

**Tabela 5.2** – Eficiência de tratamento médio obtido junto às unidades individuais do Sistema Experimental e ao Sistema Híbrido (global)

<b>PARÂMETROS</b>	<b>LCFVs</b> <b>Concentrações e</b> <b>Eficiência (%)</b>	<b>LCFH</b> <b>Concentrações e</b> <b>Eficiência (%)</b>	<b>SISTEMA HÍBRIDO</b> <b>Concentrações e Eficiência</b> <b>(%) (global)</b>
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Afl. - 30,4 mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> Efl. - 11,3 mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> 62,8%	Afl. - 11,3 mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> Efl. - 16,8 mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> 48,67% (acréscimo)	Afl. - 30,4 mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> Efl. - 16,8 mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> 44,74%
<b>DQO</b>	Afl. - 114,7 mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> Efl. - 39,2 mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> 65,82%	Afl. - 39,2 mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> Efl. - 29,9 mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> 23,7%	Afl. - 114,7 mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> Efl. - 29,9 mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> 74%
<b>N-NH<sub>3</sub></b>	Afl. -22,5 mgL <sup>-1</sup> Efl. - 9,5mgL <sup>-1</sup> 57,8%	Afl. - 9,5 mgL <sup>-1</sup> Efl. - 7,7 mgL <sup>-1</sup> 19%	Afl. - 22,5 mgL <sup>-1</sup> Efl. - 7,7 mgL <sup>-1</sup> 66%
<b>N-Nitrato</b>	Afl. - 21,1 mgL <sup>-1</sup> Efl. - 29,5 mgL <sup>-1</sup> 40% (acréscimo)	Afl. - 29,5 mgL <sup>-1</sup> Efl. - 33,4 mgL <sup>-1</sup> 13% (acréscimo)	Afl. - 21,1 mgL <sup>-1</sup> Efl. - 33,4 mgL <sup>-1</sup> 58% (acréscimo)
<b>P</b>	Afl. -7,6 mgL <sup>-1</sup> Efl. - 4,3 mgL <sup>-1</sup> 43%	Afl. - 4,3 mgL <sup>-1</sup> Efl. - 0,9 mgL <sup>-1</sup> 79%	Afl. - 7,6 mgL <sup>-1</sup> Efl. - 0,9 mgL <sup>-1</sup> 88%
<b>SST</b>	Afl. - 37,4 mgL <sup>-1</sup> Efl. - 5 mgL <sup>-1</sup> 86,63%	Afl. - 5 mgL <sup>-1</sup> Efl. - 2,3 mgL <sup>-1</sup> 54%	Afl. - 37,4 mgL <sup>-1</sup> Efl. - 2,3 mgL <sup>-1</sup> 93,85%
<b>Turbidez</b>	Afl. - 31,1 NTU Efl. - 2,2 NTU 93%	Afl. - 2,2 NTU Efl. - 1 NTU 54,6%	Afl. - 31,1 NTU Efl. - 1 NTU 97%
<b>Cor</b>	Afl.-335,7 mgPtCoL <sup>-1</sup> Efl. - 33,9 mgPtCoL <sup>-1</sup> 90%	Afl -33,9 mgPtCoL <sup>-1</sup> Efl. - 22 mgPtCoL <sup>-1</sup> 35%	Afl.- 335,7 mgPtCoL <sup>-1</sup> Efl. - 22 mgPtCoL <sup>-1</sup> 93,5%

OBS: Onde não aparece a palavra acréscimo é porque houve remoção

### **Coliformes Totais e *E.Coli***

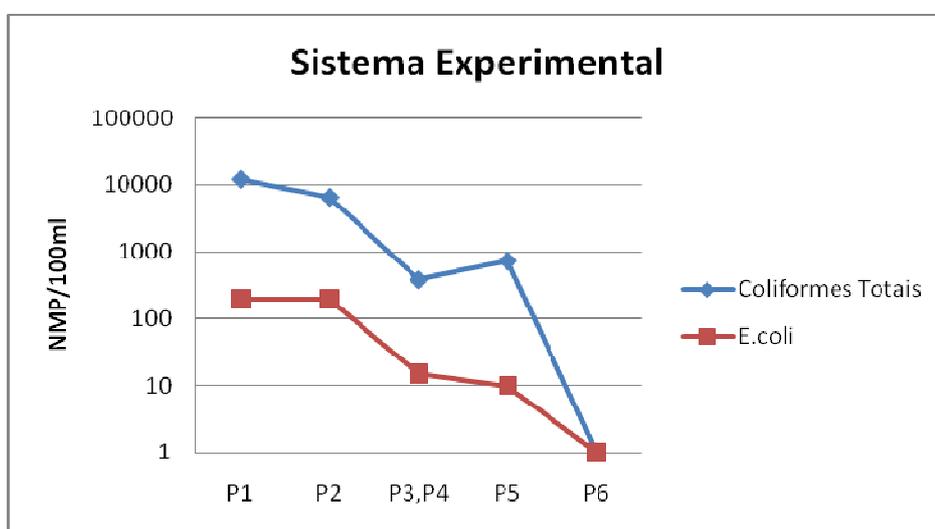
Observou-se que em todas as avaliações, utilizando-se dosagens de hipoclorito de sódio de  $1,38\text{ml.L}^{-1}$  e  $1,06\text{ml.L}^{-1}$  de hipoclorito de sódio, para uma vazão de  $3,70\text{Lmin}^{-1}$ , o efluente final do Sistema Experimental, após a reação com o hipoclorito de sódio, não apresentava Coliformes Totais, nem *E. coli*. A Tabela da Figura 5.3 apresenta os valores da amostragem na situação mais crítica ao longo da pesquisa, período em que estava ocorrendo um evento na área com 5500 pessoas presentes, com duração de 09 dias ininterruptos. Os Coliformes Totais e as bactérias *E. coli*, apresentaram nessa amostra uma tendência de queda no Sistema Experimental, conforme apresenta o gráfico da Figura 55 e a Tabela 5.3. Observou-se o decaimento de uma casa logarítmica nos LCFVs para Coliformes Totais e *E. coli*, porém esse decaimento não ocorreu no LCFH, o que aponta os leitos verticais como unidades mais potenciais na remoção desses parâmetros.

Os altos índices de remoção alcançados no Canal de Cloração, tanto para Coliformes Totais quanto para *E. coli*, apontam os dispositivos simplificados como um potencial na etapa de desinfecção, reportando para estudos mais aprofundados quanto às melhores dosagens, concentrações e tempo de contato mínimo necessário entre os microorganismos e o desinfetante. Estudos posteriores poderão trazer informações que assegurem a confiabilidade de equipamentos simples e de baixo custo para complementar o tratamento dos Leitos Cultivados. Nesse contexto, se confirmadas as expectativas, as possibilidades de reúso do efluente desses sistemas serão ampliadas, resultando na construção de um cenário apontado para um tratamento de esgoto acessível e de baixo custo. Esse nível de saneamento beneficiaria as populações carentes, as pequenas comunidades, unidades familiares locadas em áreas turísticas, ou em regiões onde a energia é de difícil acesso, como a zona rural.

**Tabela 5.3**–Resultados expressivos de CT e *E. coli*.

para situação mais crítica - 5500 pessoas

NMP/100ml		
Ensaio	Coliformes Totais	<i>E. coli</i>
P <sub>1</sub>	1.2x10 <sup>4</sup>	2x10 <sup>2</sup>
P <sub>2</sub>	6.5x10 <sup>3</sup>	2x10 <sup>2</sup>
P <sub>3</sub> , P <sub>4</sub>	3.8x10 <sup>2</sup>	1,5x10 <sup>1</sup>
P <sub>5</sub>	7.3x10 <sup>2</sup>	1x10 <sup>1</sup>
P <sub>6</sub>	0	0



**Figura 55.** Coliformes Totais e *E. coli* para a situação mais crítica (população de 5500 pessoas).

## 6 – CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES

Com o monitoramento ao longo de 07 meses do Sistema Sequencial de Leitos Cultivados de Fluxo Vertical e Leito Cultivado de Fluxo Horizontal seguidos de um Canal de Cloração, pós Lodo Ativado tratando efluente doméstico, verificou-se:

### Nos Leitos Verticais

- i) A remoção de nitrogênio amoniacal e a concentração de nitrato no efluente dos LCFVs (57,8%; 40% respectivamente) reforçam a hipótese da transferência de oxigênio no maciço filtrante. Os índices de nitrificação foram abaixo do esperado, fato justificado pelas baixas de pH nos leitos verticais, provavelmente, em consequência da flutuação populacional e das turbulências operacionais da ETE em funcionamento;
- ii) Grandes quantidades de Carbono e Nitrogênio Orgânico podem ter sido introduzidas nos LCFVs, uma vez que as turbulências operacionais da ETE em funcionamento na área levavam à produção de um efluente que não atendia aos requisitos de qualidade propostos pela concepção de um sistema de lodo ativado, alterando a qualidade do efluente em todas as unidades do sistema experimental;
- iii) Houve efetiva transferência de  $O_2$  no maciço filtrante e adaptação das bactérias nitrificantes nos LCFVs. Inclusive, foram perceptíveis bolhas de ar na superfície do maciço sendo expulsas dos interstícios quando da movimentação da água adentrando a areia, indicando o grande volume de oxigênio aí presente;
- iv) Os dois leitos verticais (LCFV<sub>1</sub>, LCFV<sub>2</sub>) tiveram desempenho semelhante quanto à remoção de todos os parâmetros, entretanto, comparativamente, a eficiência das unidades era alternada de amostra a amostra, não podendo se dizer, exatamente, qual o que apresentou melhor desempenho. Contudo, com respeito à macrófita, do início ao fim da pesquisa, o LCFV<sub>1</sub> apresentou melhor desempenho que o LCFV<sub>2</sub> em relação ao tamanho, à reprodução de plantas, ao ressecamento e viçiosidade das folhas;
- v) LCFVs preenchidos com areia possuem grande potencial na remoção de SST, Cor e Turbidez. Os respectivos valores médios, afluentes e efluentes, de 37,4 e 5,0 mgL<sup>-1</sup> para SST; 31,1 e 2,2 NTU para Turbidez; 335,7 e 33,9 mgPtCoL<sup>-1</sup> para Cor, apontam esses leitos como grandes

atenuadores de cargas associadas a esses parâmetros, cujas remoções médias correspondentes foram de 86,63% de SST, 93% de Turbidez e 90% de Cor;

vi) Os dois leitos apresentaram ótima capacidade de percolação, e, apesar do meio filtrante ser constituído de areia média ( $d_{10} = 0,16$ , MF = 1,89, U = 2,8), não houve indícios de colmatação;

vii) O plantio das macrófitas deve ser efetuado com a preservação da matéria orgânica ao redor do rizoma, especialmente nos LCFVs, para que a planta tenha umidade e aporte de nutrientes. Os procedimentos de plantio das macrófitas nos LCFVs diferem dos do LCFH;

viii) As macrófitas nos LCFVs comparativamente às do LCFH tinham aparência menos viçosa e folhagem mais estreita, e ainda apresentavam mais amarelamento nas pontas das folhas. Isso se deve, em parte, ao fato dos leitos verticais serem pouco úmidos e o leito horizontal ter umidade perene;

ix) Após 06 meses do plantio de 24 mudas e replantio gradativo (conforme ocorria mortalidade) de *Typha sp.* nos LCFVs, o número de plantas aumentou para 164, e no sétimo mês iniciou o florescimento, demonstrando a adaptação das macrófitas perante as condições submetidas;

x) Para adaptação mais rápida das macrófitas nos leitos, é relevante a identificação do seu habitat natural, pois a semelhança desse ambiente com o ambiente do leito faz uma grande diferença com respeito a adaptação e desenvolvimento dessas plantas. As macrófitas estabelecidas em solo úmido (enraizadas) tiveram nitidamente melhor adaptação nos LCFVs, comparativamente às estabelecidas em leito de rio, ao passo que no LCFH, as macrófitas coletadas no rio, tiveram ótima adaptação.

### **No Leito Horizontal**

i) Em todas as aplicações, durante os 07 meses de operação, o LCFH apresentou uma capacidade hidrodinâmica excelente, não evidenciando indícios de entupimento no meio filtrante, bem como, nos furos da tubulação de distribuição e de coleta do efluente;

ii) As macrófitas tiveram excelente desempenho, apresentando bastante vigor, apesar do ataque de lagartas. As dimensões (largura e comprimento) e a intensidade do verde das folhas nos LCFH sempre foram mais acentuadas do que nos LCFVs, em consequência da constante umidade nesses leitos;

iii) Após 06 meses do plantio de 12 mudas de *Typha sp.* no LCFH, o número de plantas aumentou para 107, e no sétimo mês teve início a floração, demonstrando a adaptação das macrófitas perante as condições submetidas, bem como, a maior adaptação nesse leito, comparativamente aos LCFVs, cuja multiplicação em cada leito foi de 82 plantas;

iv) O delineamento de tratabilidade mostrou uma tendência à continuidade da nitrificação no LCFH. Isso vem apontar para a convalidação de parte da hipótese que conduziu o trabalho de pesquisa, cuja proposta principal foi nitrificar e denitrificar através da combinação seqüencial de leitos cultivados com macrófitas de fluxo vertical e fluxo horizontal (*constructed wetlands*);

v) O LCFH não se mostrou efetivo na denitrificação, apresentou-se mais como etapa subsequente para promover a continuidade da nitrificação. Fenômeno que pode ter ocorrido devido aos índices de amônia e de oxigênio arrastados dos LCFVs para esse leito;

vi) Pode ter ocorrido, também, a passagem de nitrogênio orgânico dos verticais para o horizontal, especialmente, durante os eventos com grandes populações e de longa duração, uma vez que nessa realidade, as turbulências operacionais da ETE em funcionamento na área era mais evidente, as quais levavam à produção de um efluente que não atendia aos requisitos de qualidade propostos pela concepção de um sistema de lodo ativado;

vii) O aumento das concentrações de  $\text{DBO}_5$  (afluente –  $11,3\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$ , efluente –  $16,8\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$ ) e das concentrações de nitrato (afluente –  $29,5\text{mg.L}^{-1}$ , efluente –  $33,4\text{mgL}^{-1}$ ), bem como, a redução da DQO (afluente -  $39,2\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$ , efluente –  $29,5\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$ ) no LCFH foram os principais indicadores da pressuposta continuidade da nitrificação nesse leito;

viii) Para efluentes no nível de tratamento do efluente estudado, é necessário se ter maiores TDH, o que se pode obter com a inserção de uma ou duas unidades com as mesmas dimensões da utilizada na pesquisa operando em série, com vistas a promover a ocorrência da denitrificação;

### **No Canal de Cloração**

i) Nessa unidade os valores de pH foram os mais altos, oscilaram entre 6,94 a 8,33. As concentrações de N-Nitrato, também foram os mais elevados comparativamente às outras unidades do sistema;

ii) Com a aplicação de  $1,38\text{mL}^{-1}$ , e  $1,06\text{mL}^{-1}$  de hipoclorito, o Sistema Experimental demonstrou tendência de redução nas concentrações de Coliformes Totais e *E. coli.*, na etapa preliminar e nos LCFVs, e alcançou o valor zero em todas as amostragens no Canal de Cloração;

iii) Apesar dos resultados alcançados no efluente final em relação a esses parâmetros, a avaliação não oferecia garantia, pois critérios imprescindíveis como concentração do desinfetante e tempo de contato mínimo entre os microorganismos e o desinfetante não foram considerados, uma vez que essa etapa entrou apenas como suporte para uma prévia e sugestiva avaliação de estudos futuros;

iv) A utilização de dispositivos simples para aplicação de desinfetante pode ser uma alternativa interessante para auxiliar o processo de desinfecção, bem como, complementar o tratamento de efluentes de sistemas simplificados como LC, favorecendo o reúso de águas em regiões carentes ou onde a energia elétrica é de difícil acesso.

#### **No Sistema Sequencial (Híbrido)**

i) A seqüência de LCFVs seguidos de LCFH (sistema híbrido) apresentou excelente remoção de SST (94%), Cor (93,5), Turbidez (97%) e Fósforo (88%), provenientes da ETE em funcionamento na Estância Árvore da Vida;

ii) O Sistema Híbrido alcançou índices de nitrificação satisfatório, 58%, fato justificado pelas baixas de pH nos leitos verticais. Tal fato esteve associado, mais precisamente, ao comprometimento do efluente da ETE em funcionamento na área, que não condizia com os requisitos de qualidade propostos para um sistema de lodo ativado, do que à potencialidade do sistema estudado quanto a realização desse fenômeno;

iii) O Sistema Híbrido atendeu aos requisitos para água de reúso em termos de DQO (74% de eficiência, concentração média efluente  $33,2 \pm 26,5 \text{ mgO}_2\text{L}^{-1}$ ), SST (94% de eficiência, concentração média efluente  $7,7 \pm 2,2 \text{ mgL}^{-1}$ ), Turbidez (97% de eficiência, concentração média efluente  $1,3 \pm 0,8 \text{ NTU}$ ), Cor (93,5% de eficiência, concentração média efluente  $22,2 \pm 16,9 \text{ mgPtCoL}^{-1}$ ), P (88% de eficiência, concentração média efluente  $1,2 \pm 0,7 \text{ mgL}^{-1}$ ) para agricultura e paisagismo, conforme preconiza o “Título 22 do Código da Califórnia”;

iv) A qualidade do efluente produzido na instalação piloto não foi influenciada pelas diferentes taxas aplicadas em cada leito vertical ( $0,109\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  e  $0,163\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ) e no leito horizontal ( $0,211\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  e  $0,316\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ). A taxa maior mostrou-se vantajosa considerando dois aspectos; primeiramente em relação à macrófita, que pelo período de calor e aumento do número de plantas, necessitava de um maior aporte de água, e pela produção de maior volume efetivo de efluente tratado, sem comprometer sua qualidade;

v) A Turbidez e a Cor do efluente do Sistema Híbrido, apesar das dificuldades operacionais do ETE da EAV, estiveram consistentemente abaixo de 1UNT e  $18\text{mgPtCoL}^{-1}$ , o que não ocorreu, porém, quando houve significativa piora da qualidade do efluente secundário quando da ocorrência dos dois maiores e mais longos eventos na área de pesquisa (2800 e 5500 pessoas por 09 dias ininterruptos);

vi) Nos três leitos, mais intensamente nos verticais, as macrófitas apresentaram certo amarelamento ao longo dos dois maiores eventos (2800 e 5500 pessoas com duração de 09 dias, cada), denotando intoxicação. Entretanto, nas duas semanas subseqüentes, apresentaram sua melhor desenvoltura, seja com respeito ao vigor e intensidade do verde das folhas, ou com o crescimento e número de plantas, denotando uma desintoxicação e a ocorrência de maior aporte de nutrientes;

vii) O Sistema Experimental apresentou melhor desempenho para situações em que os eventos da área duravam 3 a 4 dias e nos demais dias a população voltava a ser de 500 pessoas, mesmo que nesses eventos a população fosse alta, ressaltando sua capacidade de recuperação;

viii) A alternância populacional (alta população nos eventos e baixa na ausência de eventos), pareceu favorecer o processo de tratabilidade no Sistema Experimental, demonstrando capacidade de recuperação do sistema, o que aponta para a viabilidade de Leitos Cultivados em áreas onde ocorre flutuação populacional, como áreas turísticas onde a flutuação ocorre semanalmente;

ix) As dificuldades do sistema com os eventos de longa duração estiveram associadas, mais precisamente, às questões operacionais da ETE em funcionamento, que nesses eventos tinha seu efluente altamente comprometido, do que com a potencialidade do sistema experimental;

x) Apesar das turbulências operacionais e da flutuação populacional, o sistema respondeu bem, demonstrando capacidade de recuperação. Entende-se que em condições operacionais normais é

recomendável o emprego de Leitões Cultivados com Macrófitas associados a sistemas de lodos ativados;

xi) O Sistema apresentou reduzida demanda de manutenção e operação, requerendo somente retirada de folhas que caíam das árvores próximas ao leito e corte das folhas amareladas das próprias macrófitas, confirmando o sistema de Leitões Cultivados como sistemas simplificados de fácil operação. Não houve surgimento de odores e plantas invasoras. Raras foram as ocorrências da presença de mosquitos, pela manhã ou no final da tarde, entretanto, era evidente essa ocorrência, também, em várias áreas da Estância;

xii) Em geral, a estética das plantas, a clarificação da água e a simplicidade do sistema foram os itens mais relevantes com respeito a aproximação do público para o Sistema Experimental. As pessoas, especialmente aquelas que não tinham conhecimento técnico (leigas), priorizavam esses itens, não apresentando o mesmo interesse a outros aspectos técnicos do sistema;

xiii) A área de pesquisa, por se tratar de uma área de eventos, colaborou para a divulgação de sistemas como esse, bem como da prática do reúso. A beleza, devido principalmente, às plantas e à água clarificada somada à simplicidade, foram os grande responsáveis para quebrar preconceitos e tabus associados a Estações de Tratamento de Esgoto. As pessoas, além de utilizar a água para regar suas plantas, despertavam o interesse para saber a respeito do funcionamento do sistema.

## 7 – CONCLUSÃO FINAL E RECOMENDAÇÕES

Finalmente, conclui-se que o Sistema Sequencial constituído de Leitos Cultivados (*constructed wetlands*) de Fluxo Vertical e Fluxo Horizontal demonstrou potencial para remover SST, Turbidez, Cor, DQO, P e efetivar a nitrificação. Entretanto, tendo em vista o enfoque dado à etapa de desinfecção, apenas como uma proposta inicial, o efluente final ainda representa riscos à saúde pública. Assim, para o reuso do efluente, uma desinfecção criteriosa é altamente recomendável.

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros, recomenda-se:

- i) Aprofundar estudos referentes à desinfecção, preferencialmente, aqueles que se integrem à simplicidade dos Leitos Cultivados, sendo de baixo custo, fácil operação e sem a utilização de energia elétrica. Recomenda-se o conjunto utilizado nessa pesquisa como proposta (canal de PVC e o dispositivo composto de frasco, macro-gotas e plug);
- ii) Continuidade dos estudos no sistema híbrido utilizando leitos cultivados de fluxo horizontal com maiores dimensões para se ter maiores TDH, ou a inserção de uma ou duas unidades nas mesmas dimensões das estudadas operando em série, com vistas a identificar o potencial de nitrificação-denitrificação;
- iii) Avaliação da remoção de nutrientes do efluente secundário, produzido sob condições normais de funcionamento de um sistema de lodo ativado, pela seqüência de leitos cultivados com macrófitas de fluxo vertical e horizontal;
- iv) Estudar uma operação mais prolongada dos Leitos Cultivados com Macrófitas de Fluxo Vertical e de Fluxo horizontal, submetidas a taxas hidráulicas maiores do que as que foram aplicadas, a fim de se identificar possíveis problemas de fluxo e colmatação do maciço filtrante;
- v) Estudos dos Leitos Cultivados em situações onde ocorre variação populacional para constatar com mais precisão sua capacidade de recuperação frente às variações das taxas aplicadas;

vi) Estudos com outras composições de meio filtrante em Sistema Híbrido, tanto em relação ao tipo e granulometria do meio filtrante quanto à espessura das camadas;

vii) Estudar o Leito Cultivado de Fluxo Vertical com diferentes granulometria da areia e com períodos de tempo mais prolongados para maior compreensão do seu processo hidrodinâmico e tempo de vida útil do meio filtrante;

viii) Estudos com outros tipos de plantas, especialmente aquelas que agregam beleza, buscando a associação da eficiência com a estética, explorando um potencial que viabiliza a quebra de tabus e preconceitos em relação a estações de tratamento de esgoto;

## 8 – ANEXOS

### 8.1 – Repercussão do Projeto Simplificado junto à comunidade

O projeto teve uma repercussão positiva junto ao público, o que pôde ser observado pelas atitudes e falas de moradores, funcionários e freqüentadores da Estância Árvore da Vida.

Inicialmente, curiosas, tais pessoas se aproximavam e perguntavam: “o que é isso aí?” A resposta dada por mim, pesquisadora, visava fazê-las compreender que estação de tratamento de esgoto pode ser algo simples, ressaltando o fato de que elas também podiam fazer um tratamento da água residuária gerada em suas residências através de sistemas de baixo custo e de fácil operação, os quais podiam ser utilizados como seus próprios jardins. Dizia, assim, que a estação na própria residência solucionaria o problema da geração de esgoto e, ao mesmo tempo, conferiria beleza ao local. E qual era a reação das pessoas com essa resposta? As pessoas leigas, por razões óbvias, não se interessavam por informações que exigiam certo teor de conhecimento técnico, como remoção de sólidos, fósforo ou nitrogênio. Entretanto, demonstravam bastante interesse quando se tratava de aspectos associados à simplicidade do sistema, à clarificação da água e à beleza, especialmente das plantas.

Para se ter uma idéia disso, um funcionário da área administrativa relatou a mim: “*fui lá no seu sistema. Gostei muito. A água não tem cheiro nenhum, né?*” Então, surpresa, perguntei: *como você sabe disso?* “*Eu aparei a água na mão e cheirei*”, respondeu o funcionário<sup>9</sup>. Ele demonstrava não ter rejeição, embora ciente de que se tratava de água residuária tratada. Outro exemplo quanto a clarificação da água diz respeito a sua utilização para regar plantas. Uma moradora sentiu-se atraída, inicialmente, pela qualidade do efluente final em termos de clarificação, o que a motivou a regar suas plantas com a água de reúso. Após a percepção do efeito dessa água nas plantas, certo dia ela me falou: “*Eu não quero mais saber de outra água; essa água é milagrosa*”. Assim, passou a ter uma rotina semanal, coletando de 4 a 6L (Figura 56-C) de água tratada no sistema experimental. Segundo o relato da moradora, as plantas, anteriormente regadas com água potável, assumiram um aspecto muito mais viçoso após a

---

<sup>9</sup> Imediatamente fiz uma advertência ao funcionário quanto à contaminação da água, informando que, apesar da clarificação, a água ainda continha microorganismos patogênicos, estando, portanto, inadequada para o contato. A partir disso, adotei como rotina advertir a todos que se aproximavam do sistema, pois, a desinfecção só era efetuada uma vez por semana quando das coletas para análises laboratoriais.

utilização da água de reúso, o que pude constatar na sua casa própria casa (Figura 56-A e B). A atitude positiva dessa moradora em relação ao sistema fez com que ela, espontaneamente, difundisse aos amigos e familiares o que havia aprendido: a existência de sistemas simples que permitiam a acessibilidade das pessoas a esgoto tratado a um baixo custo, e que o sistema ainda poderia ser utilizado como seu próprio jardim; os benefícios da utilização do esgoto tratado na rega das plantas (reúso); que atitudes do dia a dia, como regar as plantas com esgoto tratado, era uma maneira de contribuir para a preservação do meio ambiente.

Quanto ao aspecto da beleza, o sistema também teve sua função. Dentre muitas pessoas que visitaram e posaram para foto ao lado dele, destaco uma senhora que estava temporariamente na Estância Árvore da Vida visitando seus parentes. Ela se dizia apaixonada por plantas, e ressaltava o sistema experimental como um dos pontos atrativos da Estância, razão de sua insistência para conhecê-lo. Era de seu interesse, entretanto, que a visita ocorresse no momento em que eu estivesse fazendo a aplicação de esgoto, pois gostaria de saber a respeito do funcionamento do sistema, especialmente, dos benefícios associados às plantas. Ela, como todo visitante, tirou fotos de vários pontos da Estância, e o Sistema Experimental foi um dos pontos escolhidos para ficar registrado como lembrança de sua viagem (Figura 56- D e E).

Outra situação que merece destaque é a beleza de uma samambaia regada com efluente no terraço de uma casa e uma pessoa fazendo suas refeições em uma mesa próxima à planta (Figura 56-A e B). Esse quadro vem apontar a construção de um cenário de familiaridade das pessoas com a água de reúso no seu cotidiano.

Assim, a eficiência, associada à beleza e à simplicidade, foram itens de grande importância para a aproximação das pessoas. Elas demonstravam o interesse de saber mais sobre o sistema, mas não somente isso: concluíam que poderiam tratar seu próprio esgoto, agregar beleza ao local, e ainda ter como resultado final, a preservação do meio ambiente. A pesquisa foi, portanto, uma oportunidade para difundir a importância da preservação do meio ambiente, associada à prática do reúso de água, com a utilização de tecnologias simplificadas e de baixo custo.



**Figura 56.** Comportamento do público junto ao Sistema Experimental: (A) Samambaia regada com efluente do Sistema Experimental, (B) Moça fazendo refeições em mesa sob uma samambaia regada com efluente dos Leitos, (C) Pessoa pegando água para regar plantas, (D e E) Pessoas posando para fotos ao lado do Sistema.

## 8.2 – Memorial de Cálculo

**Tabela 8.1.** Cálculo dos parâmetros de projeto do LCFH

Parâmetro	Cálculo
Tempo de Detenção Hidráulico (dias)	$TDH = \frac{V_{\text{útil}}}{Q_{\text{diária}}} = \frac{A_{\text{superficial}} * A_{\text{efetiva}} * \text{Porosidade}_{\text{brita}}}{Q_{\text{diária}}} = \frac{2,75 \text{ m}^2 * 0,65 \text{ m} * 50\%}{Q_{\text{diária}}}$
Razão comprimento : largura	Retangular = 2,50 : 1,10

**Tabela 8.2 - Análise Granulométrica da Areia - NBR 7211** (Agregados: Determinação da composição granulométrica)

Peneiras		Areia					
		Tara da Peneira (g)	Material + Peneira (g)	Massa Retida (g)	% retida	% acumul.	% passa
n°	mm						
4	4.76	405.44	418.04	12.60	1.26	1.26	98.74
10	2.40	451.48	462.90	11.42	1.14	2.40	97.60
16	1.20	473.32	507.10	33.78	3.38	5.78	94.22
30	0.60	431.80	571.20	139.40	13.94	19.72	80.28
50	0.30	440.20	931.00	490.80	49.08	68.80	31.20
100	0.15	247.47	472.02	224.55	22.46	91.26	8.74
fundo	fundo	266.97	354.32	87.35	8.74	99.99	0.01
Somatória				999.90	100.00	289.21	
		Módulo de Finura da areia		2.89			

Classificação	Módulo de finura (MF)
Muito grossa (pedrisco)	> 3,90
Grossa	entre 3,30 e 3,90
Média	entre 2,40 e 3,30
Fina	< 2,40

## 9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AISSE, M.M. *et al.* (2003) – Cloração e Descloração IN: GONÇALVES, R. F. (coord.). **Desinfecção de Efluentes Sanitários**. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro/RJ; ABES. pp.113 – 168.

ANEEL, ANA (2001)- **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. 3ª ed. 327p. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e Agência Nacional de Água – ANA. Brasília-DF.

APHA; AWWA & WPCF. (1995) - **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19ª edição, Washington D.C./USA, American Public Health Association.

APHA, AWWA, WAPCF. (1998) - **Standard Méthods for the Examination of Water and Wastewater**. 20th ed.

ARIAS, C.A.; DEL BUBBA, M. e BRIX, H. (2001). Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds. **Wat. Res.** , v.35, n.5, pp.1159 – 1168.

ARMSTRONG, N.; ARMSTRONG, J. & BECKETT, P.M. (1990) - Measurements and modelling of oxygen release from roots of *Phragmites australis*. **Constructed Wetlands in Water Pollution Control** (Adv. Wat. Pollut. Control no 11) Pergamon Press, Oxford/UK, pp. 41-51.

ASANO, T. (2002) - Water from (Waste) water – the dependable water resource, **Water Science and Technology**, vol. 45, n. 8, p.23-33, 2002.

BARBOSA, F.L. (2007) – **Regulamentação do reúso de águas em refinarias – análise do modelo americano e perspectivas para o cenário nacional**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro – RJ.

BRISSAUD, F. *et al.* (2001) – Wastewater Reclamation, Recycling and Reuse – Preface. **Water Science and Technology**, v. 43, n. 10, p. IX - X.

BLUM, J.R.C. *et al.* (2003) – **Critérios e padrões de qualidade da água**. In: MANCUSO, P.C.S.; SANTOS, H.F. (editores). **Reúso de Água**. São Paulo: USP, p. 125-173.

BOUTIN, C. (1987) – Domestic wastewater treatment in tanks planted with rooted macrophytes: case study, description of the system, design criteria and efficiency. **Water Science and Technology**, v. 19,n. 10,pp. 129-140.

BRAGA, BENEDITO *et al.* (2002) – **Introdução à Engenharia Ambiental** 1ªed. 305p. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP.

BRISAUD, F.; BOUNTOUX, J.; MUJERIEGO, R.; BAHRI, A.; NURIZZO, C.; ASANO, T. (2001) – Wastewater Reclamation. Recycling. **Water Science and Technology**, vol 43, n. 10.

BRISAUD, F. *et al.* (2001) – Wastewater Reclamation, Recycling and Reuse – Preface. **Water Science and Technology**, v. 43, n. 10, p. IX - X.

BRIX, H. (1994) - Function of macrophytes in constructed wetlands. **Water Science and Technology**, vol 29, nº 4, pp. 71-78.

BRIX, H. (1997) – Macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? **Water Science and Technology**, v.35, n. 5, pp. 11 – 17.

CAPUTO, H.P. (1996) – **Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Fundamentos**. 6ª ed., v. 1. LTC Editora. 233 p.

CEPIS - Centro Panamericano de Engenharia Sanitária e Ciências do Ambiente (2000) – Eutrofização em lagos cálidos tropicais. [www.cepis.ops-oms.org](http://www.cepis.ops-oms.org). Em 15 setembro de 2004.

CHERNICHARO, C.A.L. *at al.* (2001) – Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por sistemas de desinfecção. In: CHERNICHARO, C.A.L. (Coord.). **Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios**. Projeto PROSAB. Belo Horizonte/BH. pp. 377- 454.

COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRAFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ – CBH – PCJ, Relatório Zero – **Situação dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari, Jundiá. Piracicaba**, 2002.

CONLEY, L.M.; DICK, R.I; e LION, L.W. (1991) – An assessment of the root zone method of wastewater treatment. **Research Journal of the WPCF**, v.63, n.6, pp.239-247.

COOPER, P.F.; JOB, G.D.; GREEN, M.B. e SHUTES, R.B.E. (1996) – **Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment**. Swindon: WRc plc. 184p.

COOPER, P. (1998) - A review of the design and performance of vertical flow and hybrid reed bed treatment systems. Proceedings: **6<sup>th</sup> International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control**, CEA/UNESP e IAWQ, Águas de São Pedro/SP, 27 set. a 02 de out. 1998. pp. 229-242.

COOPER, P. (2005) – The performance of vertical flow constructed wetland system with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates. **Water Science and Technology**, v.51, n.9, pp. 81-90.

CROOK, J. (1993) – Critérios de qualidade da água para reúso. **In: Revista DAE**, n. 174, nov/dez. Trad. Hilton Felício dos Santos.

DI BERNARDO, L. (1993) - **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. ABES - Rio de Janeiro/RJ. vol.II, 503p.

EPA, United States Environmental Protection Agency, Cincinnati (1987) – **Design manual. Phosphorus removal**. Technology Transfer. 311p.

ESTEVES, F.A. (1998) – **Fundamentos de Limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência /FINEP. 575p.

FELD, K. VON e KUNST, S. (1997) – N- and COD- removal in vertical-flow systems. **Water Science and technology**, v.35,pp. 79-85.

GANOULIS, J.; PAPALOPOULOU, A. (1996) – Risk Analysis of Wastewater Reclamation and Reuse. **Water Science and technology**, v.33, n. 10-11, p. 297-302.

GONÇALVES, G.F. (coord.) *et al.*, (2003) – Desinfecção por Radiação Ultravioleta. **In: Desinfecção de Efluentes Sanitários**. Projeto PROSAB. Vitória – ES; ABES.

GRANT, W.D. e LONG, P.E. (1981) – Environmental Microbiology. Glasgow, UK: Blackie & Son. **In: Constructed Wetlands for Pollution Control. Processes, Performance, Design and Operation**. IWA, 2000. England: IWA Publishing. 156 p.

GSCHLÖßL, T.; STUIBLE, H.; SLOWACZECK, W. (2000) – Performance of vertical flow and hybrid reed bed systems with an aerobic decomposition pre-treatment. **In: 6<sup>th</sup> International Conference on Waste Stabilisation Ponds and 9<sup>th</sup> International Conference on Wetland System for Water Pollution Control**. Proceedings. Avignon, France. pp. 133-140.

GUNTENSPERGEN, G.R.; STEARNS, F. & KADLEC, J.A. (1988) - Wetland vegetation. **Anais: 1<sup>st</sup> International Conference on Constructed Wetlands for Wastewater Treatment**, Chattanooga – Tennessee/USA, vol. I, n<sup>o</sup> 5, pp. 73-88.

HEGEMANN, W. (1996) - Natural wastewater treatment systems in Germany - Constructed wetlands and lagoons, **Anais: Seminário Internacional Tendências no Tratamento Simplificado de Águas Residuárias Domésticas e Industriais**, Belo Horizonte - MG, pp. 81-105.

HESPANHOL, I. (2001) - Potencial de Reúso de Água no Brasil – Agricultura, industria, municípios, recarga de aquíferos, **III Encuentro de Las Águas: Água, Vida e Desarrolo**, Santiago – Chile.

HUNT, P.G e POACH, M.E. (2000) – State of the art for animal wastewater treatment in constructed wetlands. **In: 7<sup>th</sup> International Conference on Wetlands Sistems for Water Pollution Control**. Procedings. Lake Buena Vista, FL: University of Florida/IWA. pp. 29-36.

IWA – International Water Association (2000). **Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation**. Scientific and Technical Report n. 8 London, England: IWA Publishing. 156p.

JORDÃO, E.P. e PESSOA, C.A. - (2003). **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 3.ed. ABES. Rio de Janeiro.

KADLEC, R.H. e KNIGHT, R.L. (1996) – **Treatment Wetlands**. Boca Raton, Flórida: Lewis Publishers. 893p.

KAYSER, K. KUNST, S. (2005). Processes in vertical-flow reed beds: nitrification, oxygen transfer and soil clogging. **Water Science and Technology**, v. 51, n. 9, pp. 177 – 184.

KANTAWANICHKUL, S.; NEAMKAM, P. e SHUTES, R.B.E. (2000) – Nitrogen removal in combined system: vertical vegetated bed over horizontal flow sand bed. **In: 7<sup>th</sup> International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control**. Procedings. Lake Buena Vista, FL: University o Florida/IWA. pp. 293-299.

LABER, J.; HABERL, R. & SHRESTHA, R. (1998) - Two stage constructed wetland for treating hospital wastewater in Nepal”. **Proceedings: 6<sup>th</sup> International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control**, CEA/UNESP e IAWQ, Águas de São Pedro/SP, 27 set. a 02 de out. 1998. pp. 90-100.

LAPOLLI, F.R. et al. (2003) – Desinfecção de Efluentes Sanitários por Meio da Ozonização. In: GONÇALVES, R.F. (coord.). **Desinfecção de Efluentes Sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, p. 170-208.

LAVRADOR FILHO, J. (1987) - **Contribuição para o entendimento do reúso planejado e algumas considerações sobre suas potencialidades no Brasil**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica de São Paulo - USP. São Paulo/SP.

LAZAROVA, V. *et al* (1999) – Advanced Wastewater disinfection technologies: state of the art and perspectives. **Water Science and Technology**, v.40, n. 4-5, p. 203-213.

LÉON SUEMATSU, G.; MOSCOSO, J. (1996) – **Tratamento e Uso de Águas Residuárias**. CEPIS-OPS-OMS. Lima.

LONDE, L.R. (2002). **Eficiência da filtração lenta no tratamento de efluentes de leitos cultivados**. Dissertação de Mestrado, 91p. Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP – Campinas/SP.

MANCUSO, P.C.S.; SANTOS, H.F. (2003) – A escassez e o reúso de água em âmbito mundial. In: MANCUSO, P.C.S. & SANTOS, H.F (editores). **Reúso de Água**. 1ª ed. 558p., p.1-17. Núcleo de Informações em Saúde Ambiental da USP – NISAM – USP. Barueri/SP.

MANCUSO, P.C.S. (2003) – Tecnologia de reúso de água. In: MANCUSO, P.C.S. & SANTOS, H.F. (editores). **Reúso de Água**. 1ª ed. 558p., p.291-398. Núcleo de Informações em Saúde Ambiental da USP – NISAM – USP. Barueri/SP.

MANSOR, M.T.C. (1998) – **Uso de leitos de macrófitas no tratamento de águas residuárias**. Dissertação de Mestrado, 106p. Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP - Campinas/SP.

MARA, D.D.; CAIRNCROSS, S. (1989). – **Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture**. Measures for public health protection. Geneva. WHO.

MAZZOLA, M. (2003) – **Uso de Leitos Cultivados de fluxo vertical por batelada no pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio compartimentado**. Dissertação de Mestrado, 98p. - Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP. Campinas/SP.

METCALF e EDDY (1991) – **Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse**. New York: McGraw-Hill 3.ed., 1334p.

METCALF e EDDY (2003) – **Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse**. New York: McGraw-Hill 4.ed., International Editions.

MIERZWA, J.C. (2002) – **O uso racional e o reúso como ferramenta para o gerenciamento de águas e efluentes na indústria: Estudo de caso da KODAC Brasileira**. Tese de Doutorado, 401f. - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP.

NARDOCCI, A.C. (2003) – Avaliação de riscos em reúso de água. In: MANCUSO, P. C. S. & SANTOS, H. F. (editores). **Reúso de Água**. 1ª ed. 588p., p.403-429. Núcleo de Informações em Saúde Ambiental da USP – NISAM – USP. Barueri/SP.

OLIVEIRA, F.L. (2005) – **Estudo comparativo da desinfecção com cloro e da radiação ultravioleta de efluentes de processos de lodos ativados nitrificados e não nitrificados**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica-USP. São Paulo/SP.

PHILIPPI, L.S.; COSTA, R.H.R.; SEZERINO, P.H. (1998) – Domestic effluent treatment through integrated system of septic tank and root zone. **Proceedings: 6<sup>th</sup> International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control**, CEA/UNESP e IAWQ. Águas de São Pedro/SP.

PHILIPPI, L.S.; SEZERINO, P.H. (2004) – **Aplicação de Sistemas tipo wetlands no tratamento de águas residuárias: utilização de filtros plantados com macrófitas**. Ed. do Autor. 144p. Florianópolis/SC.

PIRES, M.R. (1997) - **Desinfecção de Água para Abastecimento com Radiação Ultravioleta: Eficiência Bactericida e uma análise Econômica e Energética**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP. Campinas/SP.

PLATZER, C. (1999) – Design recommendation for subsurface flow constructed wetlands for nitrification and denitrification. **Water Science and Technology**. v. 40, n. 3, pp. 257- 263.

REBHUN *et al.* (1997) – Formation of Disinfection Byproducts during Chlorination of Secondary Effluent and Renovated water. **Water Environmental Research**, vol. 69, number 6, September/October.

REDDY, K.R. e PATRICK, W.H. (1984) – Nitrogen transformations and loss in flooded soil and sediments. *Crit. Rev.Envir. Control*, v. 13, pp. 273-309. In: **Constructed Wetlands for Pollution Control. Processes, Performance, Design and Operation**. IWA, 2000. England: IWA Publishing. 156 p.

RODRIGUES, R.S. (2005) – **As dimensões legais e institucionais do reúso de água no Brasil: proposta de regulamentação do reúso no Brasil**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo/SP.

ROSTON, D.M. (1994) - Uso de Várzeas Artificiais para tratamento de efluentes de tanque séptico. **Anais: XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, Campinas/SP, nº 94-7-210.

SALATI, E. Jr.; SALATI, E. (1999) - Wetland projects developed in Brazil. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 3, p. 19-25.

SALATI FILHO, E.; MARCONDES, D.S.; SALATI, E.; ELIAS, J.M. e NOGUEIRA, S.F. (2000) – Assessment of the efficiency of constructed wetlands system. – pilot plant – for tertiary treatment. **In: 7th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control**. Proceedings. Lake Buena Vista, FL: University of Florida/IWA. pp. 971-977.

SARTORI, L. (2004) – **Adequação da qualidade microbiológica de efluentes de tratamento secundário de esgoto sanitário pela aplicação dos desinfetantes ozônio, permanganato de potássio e ácido peracético**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – USP. São Carlos/SP.

SEZERINO, P.H. (2006) – **Potencialidade dos Filtros Plantados com macrófitas (constructed wetlands) no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical**. Tese de Doutorado, 171p. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC.

SOUZA, L.E.L. & BERNARDES, R.S. (1996) - Avaliação do desempenho de um RAFA no tratamento de esgotos domésticos, com pós-tratamento através de leitos cultivados. **Anais: III SIBESA: Simpósio Italo-Brasiliiano de Ingeniería Sanitaria-Ambientale**. Gramado - RS, vol. I, n<sup>o</sup>, junho;96.

SURAMPALLI, R.Y.; TYAGI, R.D.; SCHEIBELE, O.K.; HEIDMAN, J.A. (1997) - Nitrification, denitrification and phosphorus removal in sequential bath reactor. **Bioresearch Technology**. v. 61, pp. 15 – 157.

TOSETTO, M.S. (2005) – **Tratamento terciário de esgoto sanitário para fins de reúso urbano**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP. Campinas/SP.

USEPA - United States Environmental Protection Agency (1979) – **Progress in Wastewater Disinfection Technology**. Washington, D.C.: Office of Research and Development EPA, 600/9, 1979.

USEPA – United States Environmental Protection Agency (1988) – **Design manual on constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment**. EPA/625/1-88/022, CERL, Cincinnati – OH/USA, 1988. 83p.

USEPA - United States Environmental Protection Agency (1992) – **Guideline for Water Reuse**, Manual, Technology Transfer - EPA/625/R-92/004, sept.1992.

USEPA - United States Environmental Protection Agency (1993) - **Manual nitrogen control**. Washington.

VALENTIM, M.A.A. (2003) – **Desempenho de Leitos Cultivados (*constructed wetland*) para Tratamento de Esgoto: Contribuições para Concepção e Operação**. Tese de Doutorado, 210 p. Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP. Campinas/SP.

VALENTIM, M.A.A. (1999) - **Uso de leitos cultivados no tratamento de efluente de tanque séptico modificado**. Dissertação de Mestrado, 119p. Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP. Campinas/SP.

VALENTIM, M.A.A.; ROSTON, D.M.; JOB, S.L.P. (2000) - “Sistema "in loco" de baixo custo para tratamento de águas residuárias”. **Proceedings: IX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. ABES, Porto Seguro/BA, 09 a 14 de abril 2000. III-025, pp. 761-767.

VON SPERLING, M. (a) (1996) - **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**, Vol. 1, 2ª ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG.

VON SPERLING, M. (b) (1996) – **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**, Vol. 2, 2ª ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG.

VON SPERLING, M. (1997) – **Lodos Ativados - Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**, Vol 4, 1ª ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG.

VON SPERLING, M.; NASCIMENTO, L.V. (1999) – A resolução CONAMA 20/86 e as legislações estaduais de classificação das águas e lançamento de efluentes. **In 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. ABES, Rio de Janeiro/RJ.

VYMAZAL, J. (2005) – Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. **Ecological Engineering**. Article in press. 13p.

VYMAZAL, J. (1995) – Algae and element cycling in wetlands. Boca Raton, Flórida: CRC Press / Lewis Publisher. In: **Constructed wetlands for Pollution Control. Processes, Performance, Design and Operation**. IWA, 2000. England: IWA Publishing. 156 p.

VYMAZAL, J. (1998) - Types of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Proceedings: **6<sup>th</sup> International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control**, pp. 150-160, Águas de São Pedro/SP.

WEF – Water Environmental Federation (1994) – **Wastewater Biology: The Life Processes**. Alexandria, Va: WEF. 184 P.

WEF (1996) – **Wastewater disinfection**: manual of practice FD-10. Alexandria: Water Environmental Federation, USA.

WHITE, G.C (1999) – **Handbook of chlorination and alternative Disinfectants**. John Wiley & Sons Publication. New York.

WOOD, R.B. & McATAMNEY, C.F. (1996) - **Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: the use of laterite in the bed medium in phosphorus and heavy metal removal**. Kluwer Academic Publishers. *Hidrobiologia* vol. 340, pp. 320-331.

WPCF – Water Pollution Control Federation (1983) – **Nutrient Control**. Manual of Practice FD – 17. Alexandria, Va: WPCF. 205 p.