



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades



Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

MARIA CLARA GODINHO SOMER AVELINO

**CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS E
O COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E
BIOLÓGICOS DA FASE DE MATURAÇÃO DOS LEITOS DE FLUXO
VERTICAL**

Bauru
2012

MARIA CLARA GODINHO SOMER AVELINO

**CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS E
O COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E
BIOLÓGICOS DA FASE DE MATURAÇÃO DOS LEITOS DE FLUXO
VERTICAL**

Dissertação apresentada como requisito
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil e Ambiental da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, Área de Concentração
Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Luiz de
Oliveira



Bauru
2012

Avelino, Maria Clara Godinho Somer.

Construção de um sistema de alagados construídos e o comportamento dos parâmetros físico-químicos e biológicos da fase de maturação dos leitos de fluxo vertical /Maria Clara Godinho Somer Avelino, 2012.
109 f.: il.

Orientador: Eduardo Luiz de Oliveira

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012

1. Wetlands construídos. 2. Alagados construídos. 3. Tratamento de esgoto. 4. Fluxo vertical I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.



ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MARIA CLARA GODINHO SOMER AVELINO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 06 dias do mês de fevereiro do ano de 2012, às 10:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA SEÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO LUIZ DE OLIVEIRA do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. LUÍS FERNANDO ROSSI LÉO do(a) Departamento de Hidráulica e Saneamento / Centro Universitário - UNILINS, Prof. Dr. GUSTAVO HENRIQUE RIBEIRO DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MARIA CLARA GODINHO SOMER AVELINO, intitulada "CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS E O COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DA FASE DE MATURAÇÃO DOS LEITOS DE FLUXO VERTICAL". Após a exposição, a discente foi argüida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADA. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDUARDO LUIZ DE OLIVEIRA

Prof. Dr. LUÍS FERNANDO ROSSI LÉO

Prof. Dr. GUSTAVO HENRIQUE RIBEIRO DA SILVA

Dedico este trabalho aos meus pais Francisco e Maria Isabel.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela saúde e discernimento na realização deste trabalho;

Ao orientador e amigo Eduardo Luiz de Oliveira, pessoa que sempre irei admirar pela sabedoria, paciência e positividade.

À FAPESP, pela concessão da bolsa de Mestrado nº 2009/13371-1 e financiamento do Projeto Regular nº 2010/12445-9.

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental pela oportunidade de aprendizado.

As amigas e companheiras do programa de mestrado, Larissa Miranda Santos, Thais Von Dreifus e Patrícia Hamada que me auxiliaram e me acompanharam na execução do trabalho.

Aos familiares que estiveram ao meu lado, sempre com uma palavra de amor e incentivo;

Ao Julio, pelo carinho, amor e compreensão em todos os momentos;

Resumo

Esta dissertação de mestrado consistiu em elaborar e construir uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) que utilizasse o sistema de Alagados Construídos (wetlands) para tratar o esgoto gerado no Departamento de Educação Física e da Moradia Estudantil, ambos ligados a Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – UNESP de Bauru. Para isso foi criado um sistema híbrido de fluxo subsuperficial horizontal seguido por outro de fluxo vertical, com recirculação. O projeto foi desenvolvido no campus da universidade para atender 91 habitantes equivalentes. Nesse trabalho foram exploradas as etapas construtivas da ETE e realizado análises físico-químicos e biológicos dos alagados construídos de fluxo vertical na fase de maturação do sistema. A elaboração deste estudo é uma ferramenta importante para o desenvolvimento do sistema de alagados construídos no Brasil, uma vez que, possibilita o conhecimento das técnicas de construção, manutenção e gastos para implantação de um sistema desse tipo.

Palavras - chave: Wetlands construídos, alagados construídos, tratamento de esgoto, fluxo vertical.

Abstract

The realization of this research project is to develop and build a sewage treatment plant using the system of Constructed Wetlands to treat sewage generated in the Department of Physical Education and Student Housing, both linked to Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" - UNESP in Bauru. For it was created a hybrid system of horizontal subsurface flow followed by another vertical flow, with recirculation. The project was developed at the university campus to meet 91 equivalent inhabitants. In this work were explored constructive steps ETE and testing of physico-chemical and biological of vertical flow constructed wetlands in the maturation phase of the system. The preparation of this study is an important tool for the development of constructed wetlands system in Brazil, since it enables the knowledge of construction techniques, maintenance and expenses for deploying such a system.

Keywords: Constructed wetlands, sewage treatment, vertical flow.

Índice de Figuras

Figura 1 - Classificação dos alagados construídos para o tratamento de águas residuárias...	7
Figura 2 - Esquema representativo de alagado construído com fluxo superficial e subsuperficial horizontal.	11
Figura 3 - Esquema representativo de um alagado construído de fluxo vertical.	11
Figura 4 - Transferência de oxigênio para o substrato pela ação de macrófitas aquáticas. .	14
Figura 5 – Diagrama de granulometria dos substratos.....	18
Figura 6 - Detalhe lateral do leito filtrante.	18
Figura 7 - Grandes transformações de nitrogênio em zonas aeróbias e anaeróbias (anóxica) em sistemas alagados.	23
Figura 8 - Sistema Francês na Espanha.....	28
Figura 09 - Esquema do alagado construído de fluxo vertical com recirculação para irrigação de milho.	30
Figura 10 - Localização da área de estudo.	32
Figura 11 - Corte dos alagados construídos de fluxo horizontal.	34
Figura 12 - Corte dos alagados construídos de fluxo vertical.	34
Figura 13 - Planta da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE).	36
Figura 14 - Esquema representativo dos leitos com diferentes substratos.....	38
Figura 15 - Muda do Capim Vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i>).	40
Figura 16 - Planta de fundo dos Alagados Construídos de fluxo vertical.....	41
Figura 17 - Planta de superfície dos Alagados Construídos de fluxo vertical.	41
Figura 18 - Área escolhida para execução do projeto.....	42
Figura 19 - Terreno após a execução do serviço de terraplenagem.....	43
Figura 20 - Execução dos Alagados Construídos.	44
Figura 21 - Execução da caixa de distribuição.	44
Figura 22 - Execução das caixas de passagem.	45
Figura 23 - Instalação das tubulações.	45
Figura 24 - Instalação da geomembra e geotêxtil não tecido.	46
Figura 25 - Instalação do Sistema de Recirculação.	47
Figura 26 - Preenchimento dos leitos com os substratos.	47
Figura 27 - Plantio das mudas do Capim Vetiver.....	48
Figura 28 - Depósito para armazenamento de materiais.	48
Figura 29 - Detalhe da construção do sistema de gradeamento.	49

Figura 30 - Instalação dos Reservatórios.	50
Figura 31 - Peneira Estática Hidrodinâmica.....	50
Figura 32 - Desenvolvimento do Capim Vetiver (a) 22/09/2011 (b)14/12/2011.	56
Figura 33 - Seqüência de chuva (mm) e temperatura média do ar (C°) no mês de Outubro/2011.....	58
Figura 34 - Seqüência de chuva (mm) e temperatura média do ar (C°) no mês de Novembro/2011.	59
Figura 35 - Seqüência de chuva (mm) e temperatura média do ar (C°) no mês de Dezembro/2011.....	59
Figura 36 - Variação dos valores de oxigênio dissolvido (mg L^{-1})	61
Figura 37 – Variação temporal do oxigênio dissolvido no leito 1 de fluxo vertical.	61
Figura 38 - Variação temporal do oxigênio dissolvido no leito 2 de fluxo vertical.	61
Figura 39 - Variação dos valores de DQO (mg L^{-1})	62
Figura 40 - Variação temporal da DQO no leito 1 de fluxo vertical.	63
Figura 41 - Variação temporal da DQO no leito 2 de fluxo vertical.	63
Figura 42 - Variação dos valores de DBO (mg L^{-1})	64
Figura 43 - Variação temporal da DBO no leito 1 de fluxo vertical.	64
Figura 44 - Variação temporal da DBO no leito 2 de fluxo vertical.	65
Figura 45 - Variação dos valores de pH	66
Figura 46 - Variação temporal do pH no leito 1 de fluxo vertical.....	66
Figura 47 - Variação temporal do pH no leito 2 de fluxo vertical.....	66
Figura 48 - Variação dos valores de alcalinidade (mg L^{-1} de CaCO_3)	67
Figura 49 - Variação temporal da alcalinidade no leito 1 de fluxo vertical.	68
Figura 50 - Variação temporal da alcalinidade no leito 2 de fluxo vertical.	68
Figura 51 - Variação dos valores de condutividade ($\mu\text{S cm}^{-1}$).	69
Figura 52 - Variação temporal da condutividade no leito 1 de fluxo vertical.	69
Figura 53 - Variação temporal da condutividade no leito 2 de fluxo vertical.	70
Figura 54 - Variação dos valores de STD (mg L^{-1})	71
Figura 55 - Variação temporal de STD no leito 1 de fluxo vertical.	71
Figura 56 - Variação temporal de STD no leito 2 de fluxo vertical.	71
Figura 57 - Variação dos valores de Cor (PtCo)	72
Figura 58 - Variação temporal de Cor no leito 1 de fluxo vertical.	73
Figura 59 - Variação temporal de Cor no leito 2 de fluxo vertical.	73
Figura 60 - Variação dos valores de NTK (mg L^{-1})	74

Figura 61 - Variação temporal do NTK no leito 1 de fluxo vertical.	74
Figura 62 - Variação temporal do NTK no leito 2 de fluxo vertical.	75
Figura 63 - Variação dos valores de Nitrogênio amoniacal (mg L^{-1})	76
Figura 64 - Variação temporal do Nitrogênio amoniacal no leito 1 de fluxo vertical.	76
Figura 65 - Variação temporal do Nitrogênio amoniacal no leito 2 de fluxo vertical.	76
Figura 66 - Variação dos valores de Nitrato (mg L^{-1})	77
Figura 67 - Variação temporal do Nitrato no leito 1 de fluxo vertical.	78
Figura 68 - Variação temporal do Nitrato no leito 2 de fluxo vertical.	78
Figura 69 - Variação dos valores de Nitrito (mg L^{-1})	79
Figura 70 - Variação temporal do Nitrito no leito 1 de fluxo vertical.	79
Figura 71 - Variação temporal do Nitrito no leito 2 de fluxo vertical.	80
Figura 72 - Variação dos valores de Fósforo total (mg L^{-1})	81
Figura 73 - Variação temporal do Fósforo total no leito 1 de fluxo vertical.	81
Figura 74 - Variação temporal do Fósforo total no leito 2 de fluxo vertical.	81
Figura 75 - Variação dos valores de Fosfato (mg L^{-1})	82
Figura 76 - Variação temporal do Fosfato no leito 1 de fluxo vertical.	83
Figura 77 - Variação temporal do Fosfato no leito 2 de fluxo vertical.	83
Figura 78 – Taxas de remoção de Coliformes Totais.	84
Figura 79 – Taxas de remoção de Coliformes Fecais.	84

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Principais características das macrófitas aquáticas.	15
Tabela 2 - Mecanismos de remoção de poluentes em alagados construídos.	20
Tabela 3 - Análises realizadas e seus respectivos métodos e equipamentos.....	52
Tabela 4 – Relação de itens de Material Permanente.	54
Tabela 5 – Relação de itens de Material de Consumo.	55
Tabela 6 – Relação de itens de Serviços de Terceiros.	55
Tabela 7 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para OD (mg L^{-1}). ..	60
Tabela 8 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para DQO (mg L^{-1}).	62
Tabela 9 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para DBO (mg L^{-1}).64	64
Tabela 10 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para pH.....	65
Tabela 11 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para alcalinidade (mg L^{-1} de CaCO_3).	67
Tabela 12 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para Condutividade ($\mu\text{S cm}^{-1}$).....	69
Tabela 13 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para STD (mg L^{-1}).	70
Tabela 14 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para (PtCo).	72
Tabela 15 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para (mg L^{-1}).....	74
Tabela 16 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para Nitrogênio amoniacal (mg L^{-1}).....	75
Tabela 17 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para Nitrato (mg L^{-1}).	77
Tabela 18 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para Nitrito (mg L^{-1}).	79
Tabela 19 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para Fósforo Total (mg L^{-1}).	80
Tabela 20 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para Fosfato (mg L^{-1}).	82

Sumário

RESUMO.....	I
ABSTRACT	II
SUMÁRIO.....	VII
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 GERAL	3
2.2 ESPECÍFICOS.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 ALAGADOS NATURAIS	4
3.2 ALAGADOS CONSTRUÍDOS.....	6
3.2.1 <i>Sistemas de fluxo superficial</i>	8
3.2.2 <i>Sistemas de fluxo subsuperficial</i>	9
3.2.3 <i>Sistemas híbridos</i>	12
3.2.4 <i>Vegetação</i>	13
3.2.5 <i>Substrato</i>	17
3.3 MECANISMOS DE REMOÇÃO DOS PRINCIPAIS POLUENTES	19
3.3.1 <i>Matéria orgânica</i>	20
3.3.2 <i>Sólidos em Suspensão Totais (SST)</i>	21
3.3.3 <i>Nitrogênio</i>	22
3.3.4 <i>Fósforo</i>	26
3.4 NOVAS TECNOLOGIAS	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1 ÁREA DE ESTUDO	31
4.2 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO (ETE)	32
4.3 ALAGADOS CONSTRUÍDOS.....	37
4.4 ORÇAMENTO PRELIMINAR	42
4.5 CONSTRUÇÃO.....	42
4.6 DADOS METEOROLÓGICOS.....	50
4.7 MONITORAMENTO DO SISTEMA E ANÁLISE DOS RESULTADOS	51
4.8 CÁLCULO DAS TAXAS DE EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO.....	53
4.8.1 <i>Taxa de eficiência de remoção total</i>	53

4.8.2	<i>Taxa de eficiência de remoção parcial</i>	53
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1	ORÇAMENTO FINAL	54
5.2	VEGETAÇÃO.....	56
5.3	SUBSTRATOS	56
5.4	MANUTENÇÃO DO SISTEMA	57
5.5	DADOS METEOROLÓGICOS.....	58
5.6	INTERPRETAÇÃO DOS DADOS.....	60
5.6.1	<i>Oxigênio Dissolvido</i>	60
5.6.2	<i>Demanda Química de Oxigênio (DQO)</i>	62
5.6.3	<i>Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)</i>	63
5.6.4	<i>pH</i>	65
5.6.5	<i>Alcalinidade</i>	67
5.6.6	<i>Condutividade</i>	68
5.6.7	<i>Sólidos Totais Dissolvidos (STD)</i>	70
5.6.8	<i>Cor</i>	72
5.6.9	<i>Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)</i>	73
5.6.10	<i>Nitrogênio Amoniacal</i>	75
5.6.11	<i>Nitrato</i>	77
5.6.12	<i>Nitrito</i>	78
5.6.13	<i>Fósforo Total</i>	80
5.6.14	<i>Fosfato</i>	82
5.6.15	<i>Coliformes Totais</i>	83
5.6.16	<i>Coliformes Fecais</i>	84
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	85
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS	87

1 INTRODUÇÃO

Dentre os recursos naturais fundamentais, a água é o que apresenta maior destaque, pois sua disponibilidade é necessária a todo tipo de vida no planeta, bem como à maioria dos meios de produção. A disponibilidade de água significa não somente que ela está presente em quantidade, mas também que sua qualidade é satisfatória para suprir as necessidades de um determinado conjunto de seres vivos. O uso da água pelo ser humano, para qualquer finalidade, resulta na deterioração da sua qualidade, limitando, geralmente, seu potencial de uso, que, no entanto, deve ser respeitado nos termos da legislação que estabelece os padrões de lançamento de efluentes em corpos d'água. (SARDINHA *et al.*, 2008).

Além do prejuízo ambiental, causado pelo despejo de efluentes sanitários de forma indiscriminada no meio ambiente, têm-se os graves problemas de saúde pública e de cidadania gerados pelo déficit em saneamento básico (GALVÃO JUNIOR *et al.*, 2009). De acordo com o relatório mundial de saúde da Organização Mundial da Saúde (OMS), estima-se que, em 2007, existiam cerca de 1,1 bilhão de pessoas sem acesso a água segura e 2,6 bilhões sem saneamento adequado. (Organização Mundial da Saúde, 2007).

No Brasil, o déficit do setor de saneamento básico é elevado, sobretudo no que se refere ao esgotamento sanitário, com maior carência nas áreas periféricas dos centros urbanos e nas zonas rurais, onde se concentra a população mais pobre. (GALVÃO JUNIOR *et al.*, 2009).

Segundo IBGE, 2010 no ano de 2008, pouco mais da metade dos municípios brasileiros (55,2%) tinha serviço de esgotamento sanitário por rede coletora, que é o sistema apropriado, marca pouco superior à observada na pesquisa anterior, realizada em 2000, que registrava 52,2%. Em 2008, a proporção de municípios com rede de coleta de esgoto foi bem inferior à de municípios com rede geral de distribuição de água (99,4%), manejo de resíduos sólidos (100,0%) e manejo de águas pluviais (94,5%).

Em decorrência dessa série de problemas envolvendo a qualidade da água, em 17 de março de 2005 foi criada a Resolução nº 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que estabeleceu treze classes, de acordo com os usos preponderantes, para águas doces, salinas e salobras do território nacional, além de determinar as condições e padrões de lançamento de efluentes. Nessa resolução, foi definido, em seu artigo nº 24, que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água, após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências estabelecidos na resolução.

Atualmente, o sistema de alagados construídos tem se tornado uma prática atraente para o tratamento de águas residuárias. Esse sistema é composto por ecossistemas artificiais que, com diferentes tecnologias e plantas, utilizam os princípios básicos de qualidade da água das áreas alagadas naturais.

Com o intuito de atender à legislação vigente sobre lançamento de efluentes e conseqüentemente proteger os recursos naturais, assim como criar um espaço para o desenvolvimento de pesquisas científicas, este estudo propôs a construção de um Sistema de Alagados Construídos de fluxo subsuperficial para o tratamento do esgoto sanitário gerado no Departamento de Educação Física e na Moradia Estudantil da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” no município de Bauru – SP.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo principal desse trabalho acadêmico foi a construção da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) por Alagados Construídos e análise preliminar dos parâmetros físico-químicos e biológicos dos leitos de fluxo vertical.

2.2 Específicos

- Realizar levantamento dos gastos para implantação de um sistema desse tipo;
- Verificar as dificuldades encontradas na construção da ETE;
- Aplicar a taxa de eficiência total para o sistema em relação ao ponto de entrada e saída do sistema e a taxa de eficiência parcial nos leitos de fluxo vertical.
- Avaliar o comportamento do sistema durante a fase de maturação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Alagados naturais

Segundo Zanella (2008), a palavra estrangeira *wetlands* faz referência às áreas alagadas, ou seja, corresponde a ambientes naturais que permanecem parcial ou totalmente saturados ao longo do tempo. São zonas de transição entre os ambientes aquáticos e terrestres, conhecidas popularmente por brejos, pântanos, manguezais, charcos, várzeas e lagos muito rasos.

As áreas alagadas estão entre os ecossistemas mais produtivos existentes na Terra e são capazes de transformar poluentes comuns, que ocorrem em águas residuárias, em produtos inofensivos ou em nutrientes essenciais utilizados para uma produtividade biológica adicional. Essas transformações são conduzidas por energias ambientais naturais (sol, vento, solo), plantas e animais, e, por isso, o tratamento que utiliza esse sistema não necessita de substâncias químicas adicionais. (KADLEC & KNIGHT, 1996 *apud* CUNHA, 2006).

Conforme Hammer (1993 *apud* CUNHA, 2006), a melhoria da qualidade das águas em regiões alagadas é dependente da própria coluna d'água, do substrato, da vegetação, da população de micro-organismos associada a esses elementos e dos animais vertebrados e invertebrados.

Wetlands naturais executam muitas funções benéficas, tanto para os seres humanos quanto para os animais selvagens. Uma de suas funções mais importantes é a filtragem da água. A vegetação existente diminui a quantidade de sólidos em suspensão, absorve outros poluentes e promove as condições necessárias para o crescimento de micro-organismos. Por meio de uma série de processos complexos, esses micro-organismos também transformam e removem os poluentes da água. (EPA, 2004).

Nutrientes como nitrogênio e fósforo são depositados em áreas alagadas naturais por meio do escoamento de águas pluviais de áreas onde fertilizantes ou adubos

foram aplicados. Esses nutrientes em excesso são muitas vezes absorvidos pelo solo de *wetlands* e pelas plantas e micro-organismos. (EPA, 2004).

Áreas alagadas naturais têm sido usadas para tratamento de águas residuárias há séculos. Em muitos casos, esse uso consistiu, entretanto, na eliminação, e não no tratamento, e essas áreas serviram apenas como um receptor mais próximo. Assim, descargas descontroladas de águas residuárias levaram, em muitos casos, a uma degradação irreversível de muitos desses ecossistemas. Áreas alagadas foram consideradas, por muito tempo, como “terrenos baldios”, cientificamente negligenciados, e, portanto, o impacto do lançamento de águas residuárias não foi devidamente avaliado. (VYMAZAL & KRÖPFELOVA, 2008).

Com o intuito de proteger essas áreas, foi assinada, em 1971, na cidade iraniana de Ramsar, a Convenção sobre zonas úmidas, chamada de “Convenção Ramsar”. Trata-se de um acordo intergovernamental de importância internacional que incorpora os compromissos dos países-membros para manter o caráter ecológico de suas áreas alagadas e para planejar o uso sustentável de todas as zonas úmidas em seus territórios. Ao contrário das outras convenções ambientais globais, Ramsar não é afiliada ao sistema das Nações Unidas dos Acordos Ambientais Multilaterais, mas seu funcionamento é muito próximo ao de outros acordos ambientais multilaterais, constituindo-se como um parceiro de pleno direito dos tratados e acordos relacionados à biodiversidade. (THE RAMSAR CONVENTION ON WETLANDS, 2011).

Atualmente, 160 países participam do acordo, e a lista de zonas úmidas de importância internacional é composta por 1950 sítios, somando uma área total de 190.136.612 hectares. O Brasil assinou o acordo em 24 de setembro de 1993 e possui onze sítios Ramsar, com 6.568.359 hectares. (THE RAMSAR CONVENTION ON WETLANDS, 2011).

Acredita-se que, ao observar a eficiência dessas áreas naturais na remoção de matéria orgânica em águas poluídas por esgoto doméstico, tenha sido desenvolvido o sistema *constructed wetlands* – alagados construídos.

Os alagados construídos também podem ser uma alternativa eficaz e tecnicamente viável para o tratamento de águas residuais, pois são normalmente menos caros para construir do que as opções de tratamento de águas residuais tradicionais, além de que as despesas operacionais e de manutenção são baixas e pode-se lidar com diferentes níveis de água. (EPA, 2004).

3.2 Alagados construídos

Esse sistema de tratamento recebeu, no Brasil, diferentes denominações, tais como: terras úmidas, terras alagadas cultivadas, terras úmidas artificiais, banhados construídos, zona de raízes, zonas úmidas, leito de raízes, leitos de macrófitas, filtros plantados, tanques de macrófitas, entre outros. Para Zanella (2008), essa diversidade de denominações acaba dificultando a consolidação e reconhecimento desse sistema no País. Neste trabalho, usamos a terminologia “alagados construídos”.

Kadlec & Knight (1996 *apud* EPA, 2000) afirmam que a utilização de áreas alagadas naturais apresenta um bom histórico no tratamento de águas residuárias e, provavelmente, esse tipo de ecossistema vem sendo usado para o escoamento de esgoto desde 1912, embora os estudos sobre a utilização de alagados construídos para o tratamento de esgoto tenham-se iniciado na década de 1950, na Europa, e no final da década de 1960, nos Estados Unidos. (EPA, 2000).

Conforme Oliveira *et al.* (2005), os alagados construídos, ao contrário dos naturais, podem ser usados, deliberadamente, como sistemas de tratamento de águas residuárias, sem que haja a constante preocupação com o desempenho e eficiência do processo para minimizar os efeitos das descargas de efluentes sobre o ecossistema. Isso porque, no ambiente construído, o grau de controle é muito maior, permitindo que a experimentação quanto à composição do substrato, tipo de vegetação, padrão de fluxo, tempo de retenção e procedimento hidráulico conduza a melhor eficiência e desempenho do processo de tratamento.

Quando comparados aos sistemas de tratamento secundários convencionais, os alagados construídos apresentam vantagens quanto ao baixo custo de construção e, especialmente, de manutenção e baixa demanda de energia. Além disso, não requerem atuação de pessoal especialmente treinado e são sistemas mais flexíveis e menos suscetíveis às variações de cargas de efluentes do que os sistemas de tratamento convencionais. (BRIX & SCHIERUP, 1989).

Por outro lado, comparados aos sistemas de tratamento convencionais, requerem áreas maiores e podem apresentar comprometimento quanto ao desempenho durante o inverno em regiões temperadas. Apesar dessas (possíveis) restrições, ainda são especialmente atrativos como alternativa para o tratamento convencional de águas residuárias produzidas por pequenas e médias comunidades, em áreas esparsamente povoadas. (OLIVEIRA *et al.*, 2005).

Von Sperling (2005) comenta que a operação e a manutenção desses sistemas são bastante simples. A manutenção usualmente está associada ao controle de plantas aquáticas indesejáveis e de mosquitos (incomuns em sistemas de fluxo subsuperficial); já a remoção das plantas não é fundamental, mas pode ser necessária para manter as condições adequadas de fluxo e tratamento.

A possibilidade de exploração paisagística do ambiente onde o sistema será inserido torna-o ainda mais interessante; afinal, a estética do local contribui para a aceitação da população, que passa a ver o local de tratamento de esgoto com menos restrições, senão com maior anuência. Sem contar na exploração de práticas de educação ambiental que podem ser realizadas no local junto à comunidade.

Brix (1993); Vymazal & Kröpfelová (2008) definem que os alagados construídos podem ser classificados de acordo com vários parâmetros, no entanto os dois critérios mais relevantes são o regime do fluxo da água (superficial ou subsuperficial) e o tipo de crescimento da macrófita utilizada. Diferentes tipos de alagados construídos podem ser combinados uns com os outros (os chamados sistemas híbridos ou combinados) a fim de explorar as vantagens específicas dos diferentes sistemas. A qualidade do efluente final do sistema melhora com a complexidade da instalação.

Na Figura 1 é possível observar as diferentes classificações dos alagados construídos para o tratamento de águas residuárias.

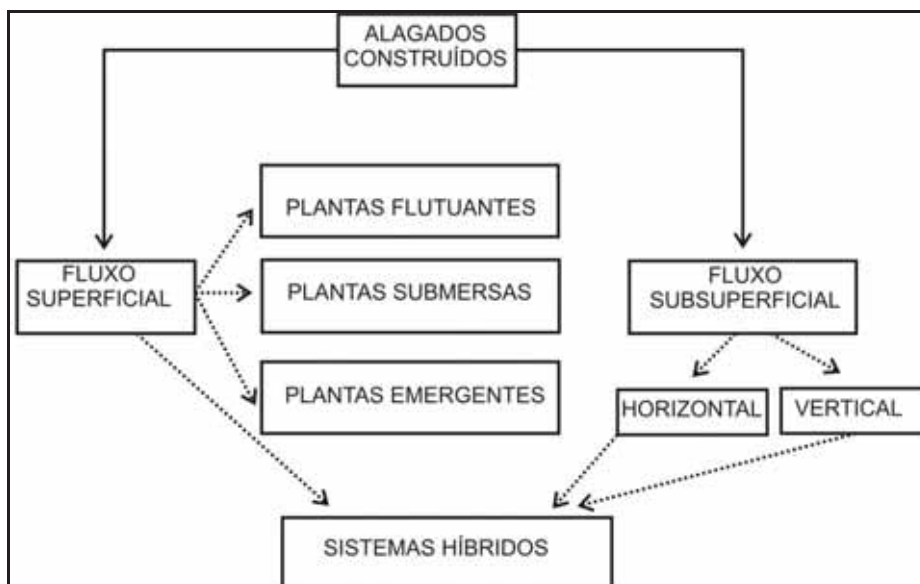


Figura 1 - Classificação dos alagados construídos para o tratamento de águas residuárias.

Fonte: Adaptado de Vymazal & Kröpfelová (2008).

3.2.1 **Sistemas de fluxo superficial**

O sistema de fluxo superficial assemelha-se aos alagados naturais em aparência, pois contém plantas aquáticas flutuantes ou enraizadas (emergentes e submersas) numa camada de solo no fundo, e a água flui livremente entre as folhas e caules das plantas expostas ao ar atmosférico. A altura da lâmina d'água situa-se entre 0,6 a 0,9 m para as zonas vegetadas (ou menos, no caso de certas plantas emergentes) e 1,2 a 1,5 m para as zonas de água livre. (VON SPERLING, 2005).

Nesse sistema, a camada superficial é aeróbia, enquanto a camada do fundo e o substrato são geralmente anaeróbios. As vantagens das áreas alagadas de fluxo superficial são de que seu capital e os custos operacionais são baixos, e a construção, operação e manutenção são simples. A principal desvantagem desses sistemas é que geralmente requerem uma maior área de terra do que outros. (DAVIS, 1995).

Esse sistema é o que melhor permite o uso de diferentes plantas em sua configuração, dividindo-se, assim, em sistemas com macrófitas flutuantes, submersas e emergentes, cada um com suas características próprias.

a) Plantas flutuantes

São sistemas formados por tanques vegetados com plantas flutuantes que utilizam a matéria orgânica e os nutrientes contidos no esgoto para sobreviver.

A vegetação utilizada é composta por uma parte aérea (caule, folha, flores e frutos) e outra radicular, que se estende pela coluna líquida; as raízes, além de permitirem a retirada de nutrientes da água, proporcionam um excelente suporte para o crescimento de micro-organismos e para a adsorção e filtração de sólidos presentes nas águas. (IWA, 2000 *apud* ZANELLA, 2008).

A presença da vegetação na superfície da água pode prejudicar a penetração da luz solar no meio aquático. Isso faz que a presença de algas seja praticamente inexistente e que a coluna d'água fique próxima da anaerobiose, criando condições favoráveis para desnitrificação.

As espécies de macrófitas flutuantes mais usadas em alagados de fluxo superficial são o aguapé (*Eichhornia crassipes*) e a lentilha d'água (*Lemna spp*). Espécies como a alface d'água (*Pistia Stratiotis*) e a azola (*Azolla spp*) também podem ser utilizadas. (IWA, 2000 *apud* ZANELLA, 2008).

b) Plantas submersas

As plantas desse tipo crescem com a maior parte da área fotossintetizante submersa na coluna líquida e podem ser divididas em fixas (parte da vegetação fica presa em um meio-suporte ou substrato ao fundo da coluna d'água) ou livres (a planta fica solta na coluna d'água).

Esse sistema é bastante sensível, pois o crescimento da vegetação depende da penetração da luz solar dentro do tanque. A presença de esgoto com alto teor de turbidez pode prejudicar a difusão da luz e conseqüentemente o crescimento da planta.

Plantas submersas só crescem bem, no entanto, em águas com presença de oxigênio, portanto não podem ser usadas em água residuária com alto teor de matéria orgânica, pois a decomposição microbiana da matéria irá criar condições anóxicas. (BRIX, 1993 *apud* VYMAZAL & KRÖPFELOVA, 2008).

c) Plantas emergentes

Esse sistema assemelha-se muito com os brejos, onde parte da estrutura vegetal encontra-se em contato com a atmosfera.

A diversidade de plantas que podem ser utilizadas é muito grande, possibilitando assim a exploração estética do sistema. Segundo Vymazal & Kröpfelová (2008), as espécies mais utilizadas para sistemas de fluxo superficial são: na Europa, *Phragmites australis* (junco comum), *Scirpus lacustris*; na América do Norte, *Typha spp.* (Taboa), *Scirpus spp.* (Junco), *Sagittaria latifolia*; na Austrália e Nova Zelândia, *Phragmites australis*, *Typha spp.*, *Bolboschoenus*, *Scirpus tubernaemontani*.

Nessa configuração, a principal fonte de oxigênio vem da aeração promovida na superfície livre do líquido, em contato com o ar atmosférico. (VYMAZAL, 1998 *apud* ZANELLA, 2008).

3.2.2 Sistemas de fluxo subsuperficial

Esses sistemas não se assemelham a alagados naturais, pois não há água livre na superfície; contêm um leito composto de pequenas pedras, cascalho, areia ou solo, dando suporte ao crescimento de plantas aquáticas. O nível d'água permanece abaixo da superfície do leito, e o esgoto flui em contato com as raízes e os rizomas das plantas (onde se desenvolve o biofilme bacteriano), não sendo visíveis ou disponíveis para a biota aquática. A altura do meio situa-se entre 0,5 e 0,6 m, e a da água, entre 0,4 e 0,5 m. O

cascalho deve ser de tamanho tal que permita o fluxo continuado dos esgotos, sem problemas de entupimento. A maior parte da zona subsuperficial é anaeróbia, com sítios aeróbios imediatamente adjacentes aos rizomas e raízes. O potencial de geração de odores e proliferação de vetores é baixo. (VON SPERLING, 2005).

Em decorrência das restrições hidráulicas do substrato, os alagados de fluxo subsuperficial são mais adequados para efluentes com concentrações relativamente baixas de sólidos e que tenham condições de fluxo uniforme. Esses sistemas são frequentemente usados para reduzir a DBO em efluentes domésticos. Suas vantagens são: maior tolerância ao frio, minimização dos problemas de pragas e odor e, possivelmente, maior potencial de tratamento por unidade de área do que sistemas de fluxo superficial. Quanto às desvantagens, são: maior custo de construção, manutenção e reparação, em relação aos alagados construídos de fluxo superficial, além de que alguns sistemas apresentaram problemas com entupimentos. (DAVIS, 1995).

Os alagados construídos de fluxo subsuperficial podem ser classificados de acordo com a direção do fluxo: horizontal (FH) ou vertical (FV). O tratamento dos alagados de fluxo vertical podem ser subdivididos ainda em fluxo descendente e fluxo ascendente, conforme o efluente seja alimentado sobre a superfície, ou ao fundo do leito. (VYMAZAL & KRÖPFELOVÁ, 2008).

a) Horizontal

O sistema de fluxo horizontal é a concepção mais comum dos alagados construídos, podendo ser de fluxo superficial. Nesse sistema, o efluente entra no leito e segue pela seção porosa (substrato), fazendo um caminho horizontal; ao final do leito, o efluente é recolhido. A Figura 2 apresenta duas configurações de alagados construídos de fluxo horizontal (superficial e subsuperficial).

Durante a passagem pelo leito, o esgoto entra em contato com uma rede de zonas aeróbias, anóxicas e anaeróbias. As zonas aeróbias ocorrem em torno das raízes e rizomas das plantas que transferem o oxigênio para o substrato. (BRIX, 1987b; COOPER *et al.* 1996 *apud* VYMAZAL & KRÖPFELOVA, 2008).

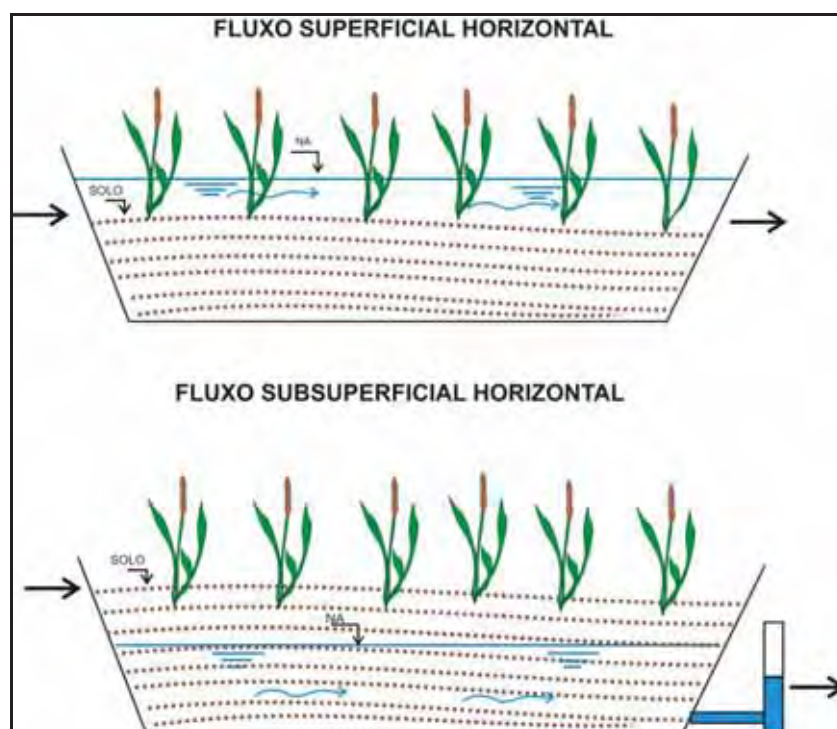


Figura 2 - Esquema representativo de alagado construído com fluxo superficial e subsuperficial horizontal. Fonte: Adaptado de Von Sperling (2005).

b) Vertical

Os alagados de fluxo vertical seguem a metodologia de um filtro e geralmente consistem em um leito preenchido com cascalho e coberto com areia, onde é plantada a vegetação. O cascalho colocado ao fundo do leito possui uma granulometria maior do que o colocado na superfície. O efluente é inserido na superfície do leito de forma intermitente e desce por gravidade, sendo recolhido ao fundo por drenos. O esquema de um alagado construído de fluxo vertical é apresentado na Figura 3.

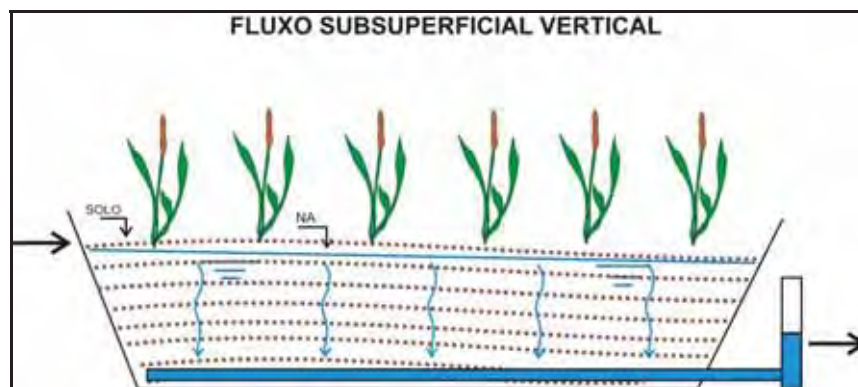


Figura 3 - Esquema representativo de um alagado construído de fluxo vertical. Fonte: Adaptado de Von Sperling (2005).

O principal objetivo da presença de plantas em alagados de fluxo vertical é contribuir para manter a condutividade hidráulica no leito. (VYMAZAL & KRÖPFELOVA, 2008).

Nesses sistemas, a composição do substrato é muito importante; a seleção do tamanho das partículas de areia e do cascalho, bem como a disposição adequada destes em camadas, são essenciais para que o influente distribua-se uniformemente sobre a superfície toda, sem que ocorram entupimentos.

Cooper (2005 *apud* VYMAZAL & KRÖPFELOVA, 2008) apontou que os fatores mais importantes a ser levados em consideração no *design* de um alagado construído de fluxo vertical são:

- Deve-se produzir um sistema que permita a passagem do esgoto pelo leito antes da chegada da próxima carga, respeitando o tempo necessário para o crescimento das bactérias responsáveis pelo tratamento.
- Área de superfície suficiente para transferência de oxigênio pelo meio, para o crescimento de bactérias aeróbias.

3.2.3 **Sistemas híbridos**

Além dos esquemas isolados descritos, há ainda a possibilidade de uni-los para obter uma configuração que atenda às necessidades desejadas. Essa união é conhecida como sistemas combinados ou híbridos (combinação de diferentes tipos de alagados construídos).

Sistemas de fase única exigem que todos os processos de remoção ocorram no mesmo espaço. Em sistemas híbridos, diferentes células são projetadas para diferentes tipos de reações (DAVIS, 1995).

Vymazal & Kröpfelová (2008) comentam que o interesse em conseguir um efluente bem nitrificado vem crescendo cada vez mais, no entanto sistemas de FH não conseguem atingir esse propósito, pois a capacidade de transferência de oxigênio nesses sistemas é limitada; ao contrário, isso é possível em sistemas de FV onde o transporte de oxigênio é facilitado, contribuindo para que pouca ou nenhuma desnitrificação ocorra no meio.

Em sistemas híbridos, as vantagens de vários sistemas podem ser agrupadas para complementar uns aos outros. É possível produzir um efluente de baixa DBO,

totalmente nitrificado, parcialmente desnitrificado e, portanto, com menores concentrações de Nitrogênio Total. (COOPER, 1999, 2001 *apud* VYMAZAL & KRÖPFELOVA, 2008).

Oliveira *et al.* (2006b) descreveram o uso de um alagado construído de fluxo subsuperficial horizontal como parte de um sistema híbrido que também contém um alagado construído de fluxo superficial para tratamento de esgoto. Esse projeto encontra-se em operação no Jardim Botânico do município de Bauru/SP. Os resultados dos 18 primeiros meses de operação do sistema demonstram uma boa eficiência de tratamento para o alagado de fluxo horizontal na remoção de: Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅) - 88%; Demanda Química de Oxigênio (DQO) - 78%; Nitrogênio amoniacal (NH₃-N) - 79% e Fosfato (PO₄-P) - 42%. Além de realizar o tratamento de todo o esgoto gerado no local, esse projeto também é usado para trabalhos de educação ambiental junto à comunidade.

3.2.4 **Vegetação**

O sucesso dos alagados construídos depende que as funções ecológicas sejam similares às dos alagados naturais, que se baseiam especialmente em interações dentro das comunidades vegetais. Pesquisas confirmam que o tratamento de águas residuárias para remoção de poluentes típicos, como Sólidos em Suspensão Totais (SST) e DBO, em alagados construídos geralmente é melhor em leitos com plantas do que em leitos adjacentes sem plantas. (BAVOR *et al.*, 1989; BURGOON *et al.*, 1989; GEARHEART *et al.*, 1989; THUT, 1989 *apud* EPA, 2000).

O uso de comunidades vegetais em alagados construídos é um item indispensável para o sucesso desses sistemas. As macrófitas aquáticas têm sido bastante utilizadas com a finalidade de melhorar as condições de tratamento.

É certo que solos de áreas alagadas naturais submersas por longos períodos são anaeróbios, do mesmo modo que em sistemas construídos. Para balancear essa situação, usam-se macrófitas aquáticas, as quais incorporam ar pelas folhas e o transferem para os rizomas e raízes por meio do aerênquima (um tipo de tecido vegetal), permitindo que o substrato, na vizinhança imediata de rizomas e raízes, fique aeróbio pela transferência de oxigênio, Figura 4. (MARQUES, 1999).

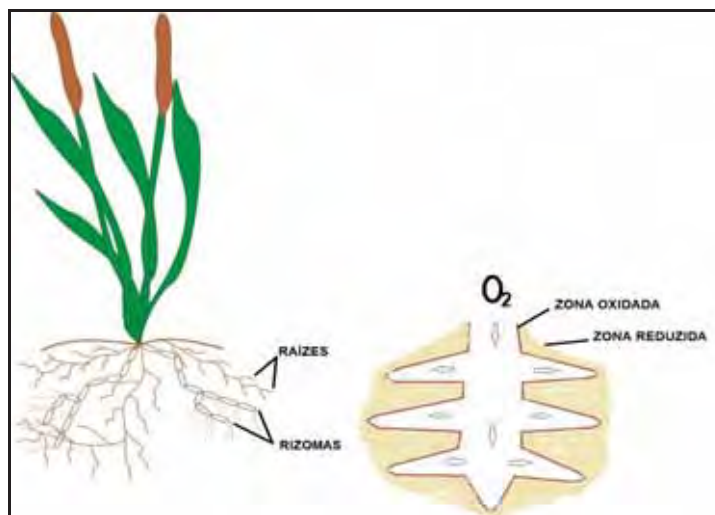


Figura 4 - Transferência de oxigênio para o substrato pela ação de macrófitas aquáticas. Fonte: Adaptado de Marques (1999).

Para Brix (1994), as macrófitas aquáticas são um componente indispensável na composição de um alagado construído. Dentre suas principais funções, destacam-se os efeitos físicos provocados, a saber: estabilização da superfície dos leitos; fornecimento de boas condições para filtração mecânica; eliminação (ou diminuição) de riscos de entupimento em sistemas de fluxo vertical; isolamento das geadas durante o inverno; desenvolvimento de uma enorme área para o crescimento microbial; transferência de oxigênio para a rizosfera através das raízes, aumentando a degradação aeróbia da matéria orgânica e a nitrificação, além de tornarem o sistema de tratamento de esgoto esteticamente agradável.

Recentemente, o uso de áreas alagadas para a remoção de resíduos orgânicos tem sido utilizado no Brasil com resultados muito estimulantes como sistemas de tratamento de água. Para pequenas comunidades, o uso de macrófitas aquáticas dessas áreas alagadas tem sido efetivo na remoção de material em suspensão e nutrientes inorgânicos. (BRAGA *et al.* 1999).

Segundo Hoffmann *et al.* (2011), as seguintes recomendações devem ser seguidas na escolha da planta a ser usada em um alagado construído:

- Usar preferencialmente espécies nativas do local onde o sistema for inserido; o uso de plantas exóticas pode possibilitar a invasão de espécies indesejadas;
- Usar espécies que cresçam em áreas alagadas naturais ou rios, pois suas raízes são adaptadas ao cultivo em condições saturadas;
- Usar preferencialmente plantas com raízes extensas e sistema de rizoma abaixo do solo;

- Escolher plantas capazes de suportar períodos de saturação, assim como períodos de seca.

Existem diferentes espécies de macrófitas aquáticas (flutuantes, submersas e emergentes) que podem ser utilizadas nos sistemas de alagados construídos. A Tabela 1 classifica as principais características dessas plantas.

Tabela 1 - Principais características das macrófitas aquáticas.

Tipos de Plantas	Características gerais e exemplos comuns	Função ou importância para o tratamento	Função ou importância no habitat
Macrófitas aquáticas flutuantes livres	Raízes ou estruturas semelhantes ficam suspensas a partir das folhas. Movimentando-se com a corrente d'água. Ex: Lentilha comum, Lentilha gigante.	Os efeitos primários são a absorção de nutrientes e sombreamento para evitar o crescimento de algas. A esteira de vegetação densa e flutuante limita a difusão de oxigênio vindo da atmosfera. A lentilha d'água estará presente como uma espécie invasora.	A densa esteira de vegetação impede a difusão de oxigênio atmosférico e a penetração de luz solar até a vegetação submersa. As plantas oferecem abrigo e alimento para os animais.
Macrófitas aquáticas flutuantes fixas	Geralmente as folhas são flutuantes, mas podem ser submersas. Enraizado para baixo. Ex: Nenúfar.	Os efeitos primários são suporte para adesão microbiana e liberação de oxigênio para coluna d'água durante o dia. A densa esteira de vegetação limita a difusão de oxigênio da atmosfera.	A densa esteira de vegetação além de limitar a difusão do oxigênio atmosférico também impede a penetração de luz solar no meio. As plantas oferecem abrigo e alimento para os animais.
Macrófitas aquáticas submersas	Normalmente está totalmente submersa, pode ter folhas flutuantes. Enraizado para baixo. Ex: Lagoa de plantas daninhas, Erva daninha d'água.	Efeitos primários fornecem estrutura para adesão microbiana e oxigênio para coluna d'água durante o dia.	As plantas fornecem abrigo e alimento para os animais (especialmente peixes).
Macrófitas aquáticas emergentes	Herbáceas (não lenhosas). Enraizada no fundo. Tolerância condições de inundação e saturação. Ex: Taboa, Junco comum, Caniço.	A finalidade primária é fornecer estrutura para reforçar a indução a floculação e sedimentação. Os efeitos secundários são o sombreamento para retardar o crescimento de algas, quebra-vento para promover condições de repouso para sedimentação, e isolamento durante os meses de inverno.	As plantas fornecem alimento e abrigo para os animais, e promovem condições estéticas agradáveis para os humanos.

Fonte: EPA (2000).

Na sequência, são descritas algumas das plantas normalmente usadas em sistemas de alagados construídos.

a. Taboa (*Typha spp.*)

Ocorrem em todo o mundo e são plantas vigorosas capazes de crescer sob condições ambientais diversas e fáceis de propagar. O rizoma pode ser coletado, plantado e produzir plantas durante o período de crescimento. As espécies de taboa não são suscetíveis a estender suas raízes até uma profundidade superior a 40 cm e não são tão eficientes como o junco na oxigenação de um leito de alagado construído. (CAMPBELL & OGDEN , 1999).

b. Junco (*Scirpus spp.*)

Grande parte cresce em águas interiores e costeiras, e várias espécies são encontradas na maior parte dos Estados Unidos, em pântanos e em águas rasas de lagos ou lagoas. Embora não seja tão vigoroso ou generalizado como a taboa, é muito eficiente na remoção de nitrogênio e, tolera uma ampla faixa de pH. Espécies de junco apresentam raízes capazes de penetrar a uma profundidade de 2,5 a 3,0 metros ou mais e são, portanto, extremamente úteis na oxigenação da porção mais profunda de um leito de alagado construído de fluxo subsuperficial. (CAMPBELL & OGDEN , 1999).

c. Caniço (*Phragmites spp.*)

Trata-se de uma gramínea perene, tolerante a inundações, caracterizada por um extenso sistema de rizoma, que geralmente penetra a profundidades de cerca de 0,6 m a 1,0 m. As hastes são rígidas, com entrenós ocos. A inflorescência é uma panícula de inclinação de até 50 cm de comprimento. (VYMAZAL & KROPFELOVA, 2008).

d. Papirus (*Cyperus papyrus*)

Planta perene, ereta, de até 4 metros de altura, com um pequeno rizoma. O papirus cresce em águas que fluem lentamente com um metro de profundidade, podendo crescer e espalhar-se vegetativamente ao flutuar. *C Papyrus* é muito usado em sistemas de alagados construídos na África. (VYMAZAL & KROPFELOVA, 2008).

3.2.5 **Substrato**

As macrófitas aquáticas podem crescer em uma variedade de meios, incluindo resíduos orgânicos (palha de arroz, casca de árvores), resíduos de mineração de carvão, lodo, argila, areia, silte, cascalho e argila expandida. (MARQUES, 1999).

Os substratos utilizados atualmente como suporte de crescimento para as plantas, raízes e conseqüentemente para as bactérias são os normalmente encontrados no mercado, ou seja: areia grossa, pedrisco, pedras britadas ou pedregulhos, os quais possuem um valor comercial elevado para a aplicação nesses sistemas, em decorrência do grande volume de material utilizado. Nesse sentido, o uso de materiais alternativos, tais como bambu picado, pneu picado, isopor reciclado, conchas, entre outros, tem-se mostrado bastante eficaz.

Segundo Vymazal (1998 apud ZANELLA, 2008), estudos antigos mostram que os primeiros trabalhos realizados na Alemanha com alagados construídos utilizavam o próprio solo local como substrato, entretanto a baixa condutividade hidráulica desse solo causava escoamento superficial, impedindo que o esgoto entrasse em contato com a região da rizosfera das plantas.

Nos alagados construídos de fluxo subsuperficial horizontal, os espaços vazios do substrato servem como canais de vazão e facilitam o escoamento da água residuária. Uma característica peculiar de alguns substratos é a remoção de fósforo, de modo que materiais com alto potencial de remoção têm textura fina, com baixa ou moderada permeabilidade, limitando a capacidade hidráulica do sistema. Para melhorar a condutividade hidráulica e ao mesmo tempo manter certa capacidade de adsorção de fósforo, os substratos próprios do local onde o alagado construído será inserido podem ser misturados com outros materiais. (MARQUES, 1999).

Em alagados construídos com fluxo vertical, a composição do substrato é muito importante; a seleção do tamanho das partículas de areia e dos pedregulhos, bem como a disposição adequada destes em camadas são essenciais para que o afluente se distribua uniformemente sobre a superfície toda, sem que ocorra entupimento. Nesse sistema, o substrato funciona como uma “meio filtrante”, pois a água residuária que entra no sistema escoar verticalmente pelo leito, sofrendo uma filtração.

Brix & Arias (2005) recomendam que um “meio filtrante” deva conter areia com um diâmetro d_{10} entre 0,25 e 1,20 mm, e um d_{60} entre 1,0 e 4,0 mm; o coeficiente de uniformidade ($U = d_{60}/d_{10}$) deve ser inferior a 3,5. A curva de distribuição dos grãos deve

estar localizado entre as duas linhas de corte no diagrama. (Figura 5). O conteúdo de argila e silte (partículas inferiores a 0,125 mm) deve ser inferior a 0,5%. Na prática, só devem ser utilizados materiais que apresentem uma granulometria maior do que a da areia. A profundidade efetiva do leito é de até 1,0 m, e a superfície deste deve estar toda nivelada para que o efluente se distribua uniformemente. Ao fundo, deve-se colocar um sistema de drenagem, separado da areia por uma camada de cascalho, que irá impedir a entrada de partículas indesejáveis na tubulação de drenagem. É importante também fazer uma impermeabilização do solo onde o leito será construído, a qual pode ser feita com uma geomembrana (Figura 6).

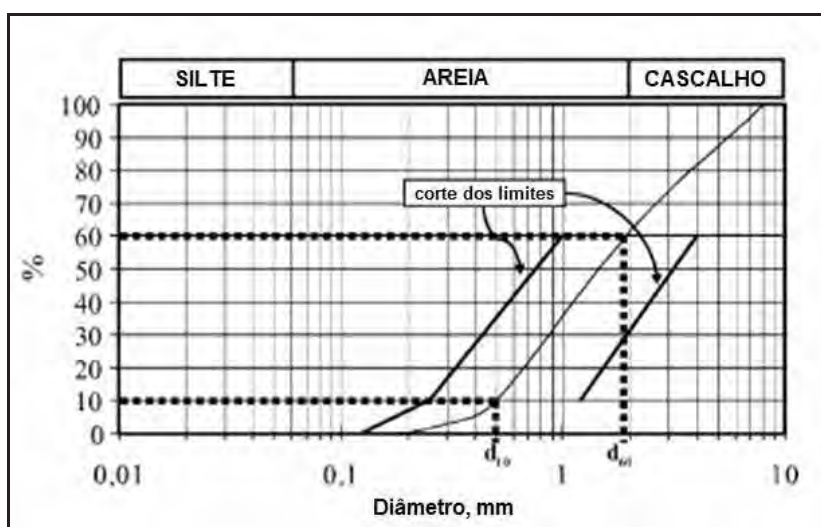


Figura 5 – Diagrama de granulometria dos substratos. Fonte: Brix & Arias (2005).

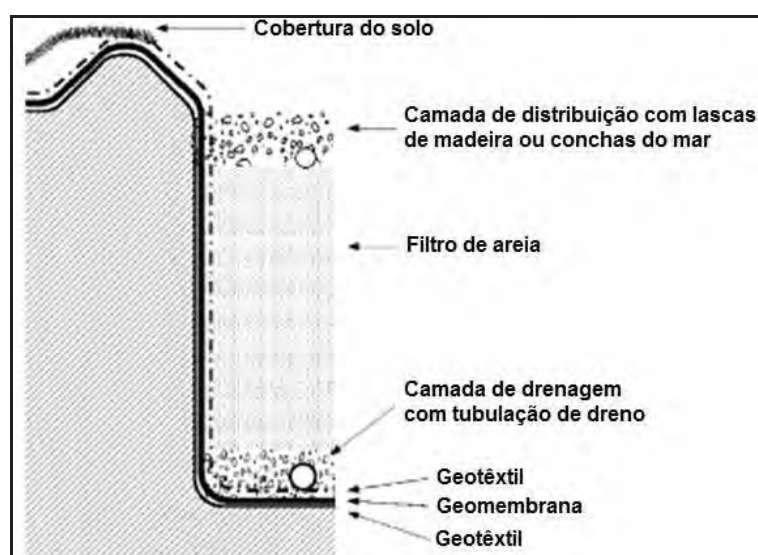


Figura 6 - Detalhe lateral do leito filtrante. Fonte: Brix & Arias (2005).

3.3 Mecanismos de remoção dos principais poluentes

Os alagados construídos são sistemas altamente complexos que separam e transformam contaminantes por meio de processos físicos, químicos e biológicos que podem ocorrer simultaneamente ou em sequência, enquanto o esgoto flui pelo sistema (EPA, 2000).

Segundo Hoffmann *et al.* (2011), os alagados são muitas vezes considerados sistemas simples, mas os processos físicos, químicos e biológicos de tratamento são de difícil compreensão. Esses processos ocorrem em diferentes zonas do leito, que incluem:

- Leito (composto por sedimentos e areia);
- Detritos (material particulado “morto”, exemplo: serrapilheira);
- Água;
- Ar;
- Plantas e raízes;
- Zonas de biomassa (exemplo: bactérias que crescem no substrato ou anexadas às raízes das plantas).

O tratamento de águas residuárias no “leito filtrante” de alagados construídos é o resultado de interações complexas entre todas essas zonas. Há um mosaico de regiões com diferentes níveis de oxigênio nos alagados construídos, e essa diversidade desencadeia os diversos processos de degradação e remoção de poluentes. (HOFFMANN, 2011).

Estudos em escala real e experimental têm demonstrado que esses sistemas apresentam boa capacidade de redução da DBO, Sólidos em Suspensão (SS), Nitrogênio (N), Fósforo (P), traços de metais e orgânicos patogênicos. A redução desses poluentes é feita por diversos mecanismos de sedimentação, filtração, precipitação e adsorção química e interações microbiana e da vegetação (MARQUES, 1999), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Mecanismos de remoção de poluentes em alagados construídos.

Mecanismos	Contaminante	Descrição
Físico		
• Sedimentação	P – Sólidos sedimentáveis S – Sólidos coloidais I – DBO, nitrogênio, fósforo, metais pesados, orgânicos refratários, bactérias, vírus	Sólidos sedimentáveis por gravidade (e contaminantes) em terra úmida e lagoas.
• Filtração	S – Sólidos sedimentáveis, sólidos coloidais	Partículas sedimentáveis mecanicamente à medida que a água passa por meio do substrato, massa de raízes ou peixes.
• Adsorção	S – Sólidos coloidais	Força atrativa entre partícula (van de Waals).
Químico		
• Precipitação	P – Fósforo, metais pesados	Formação de coprecipitação com compostos insolúveis.
• Adsorção	P – Fósforo, metais pesados S – Orgânicos refratários	Adsorção no substrato e superfícies de plantas.
• Decomposição	P – Orgânicos refratários	Decomposição ou alteração de compostos menos estáveis por irradiação UV, oxidação e redução.
Biológico		
• Metabolismo Microbiano ^a	P – Sólidos coloidais, DBO, nitrogênio, orgânicos refratários, metais pesados	Remoção de sólidos coloidais e orgânicos solúveis por bactérias suspensas, bênticas e epifíticas. Nitrificação/ desnitrificação bacteriana. Oxidação de metais mediada por microorganismos.
• Metabolismo de plantas ^a	S – Orgânicos refratários, bactérias, vírus	Sob condições adequadas, quantidades significantes desses contaminantes são tomadas pelas plantas.
• Decaimento natural	P – Bactérias e vírus	Decaimento natural ou organismos em um meio desfavorável.

P – efeito primário; S – efeito secundário; I – efeito incidental (efeito ocorrendo incidentalmente pela remoção de outro contaminante).

^a Metabolismo inclui tanto reações de biossíntese como reações catabólicas.

Fonte: Marques (1999).

3.3.1 *Matéria orgânica*

A matéria orgânica presente nos corpos d'água e nos esgotos é a principal causadora do consumo de Oxigênio Dissolvido (OD) pelos micro-organismos nos seus processos metabólicos de utilização e estabilização da matéria orgânica. O consumo de OD é um dos fatores mais significantes de poluição das águas. Há uma grande dificuldade para quantificar a matéria orgânica existente em águas residuárias, portanto normalmente se utilizam métodos indiretos para determinar a matéria orgânica, ou seu potencial poluidor. Assim, existem duas principais maneiras: (a) Medição do consumo de oxigênio DBO;

DBO e (b) Medição do carbono orgânico (Carbono Orgânico Total – COT). A DBO e a DQO são os parâmetros tradicionalmente mais utilizados. (VON SPERLING, 2005).

Segundo Hoffmann *et al.* (2011), em alagados construídos de fluxo subsuperficial toda a matéria orgânica é degradada e estabilizada, durante um longo período, por processos físicos e biológicos. A matéria orgânica particulada é convertida em DBO solúvel por processos de sedimentação ou filtração; já a matéria orgânica solúvel é degradada por bactérias fixas no biofilme formado nos caules e raízes das plantas e em partículas do substrato.

Os valores de remoção de DBO em alagados construídos de fluxo subsuperficial horizontal e vertical são, respectivamente: 80-90% e 90-99% (MOREL; DIENER, 2006; RIDDERSTILPE, 2004 *apud* HOFFMANN, 2011).

3.3.2 Sólidos em Suspensão Totais (SST)

Segundo Braga *et al.* (2005), os sólidos em suspensão aumentam a turbidez da água, diminuindo sua transparência. Com o aumento da turbidez, há uma redução nas taxas de fotossíntese, prejudicando a procura de alimento para algumas espécies, levando a desequilíbrios na cadeia alimentar.

Oliveira *et al.* (2005) pondera que, nos alagados construídos, após a preliminar remoção mecânica de sólidos em suspensão, aqueles remanescentes são removidos por sedimentação e filtração (processos físicos), assim como ocorre, em significativa proporção, com a DBO, nutrientes e organismos patogênicos.

Conforme EPA (2000), em alagados construídos de fluxo superficial os sólidos em suspensão totais são produzidos por processos naturais que ocorrem dentro do leito (morte de invertebrados, fragmentação de detritos e plantas, entre outros fatores). Nesses sistemas, os mecanismos predominantes na remoção física de sólidos suspensos são floculação, sedimentação e filtração.

Hoffmann *et al.* (2011) consideram que os principais processos de remoção de sólidos em suspensão em alagados construídos de fluxo subsuperficial são a filtração e a decomposição feita por bactérias anexas ao solo após longos períodos de retenção.

Alagados construídos de fluxo subsuperficial agem como filtros de cascalho e, assim, oferecem oportunidades para separação de SST por sedimentação gravitacional; ocorre também a adsorção por bactérias fixas ao biofilme formado no substrato e nas raízes das plantas. (EPA, 2000).

3.3.3 Nitrogênio

Dentro do ciclo do nitrogênio na biosfera, este se alterna entre várias formas e estados de oxidação. No meio aquático, o nitrogênio pode ser encontrado nas seguintes formas: nitrogênio molecular (N_2), escapando para a atmosfera, nitrogênio orgânico (dissolvido e em suspensão), amônia (livre NH_3 e ionizada NH_4^+), nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-). (VON SPERLING, 2005).

A descarga de nitrogênio em águas superficiais e subterrâneas é preocupante por uma série de razões. A acumulação excessiva de nitrogênio nas águas superficiais, por exemplo, pode levar a desequilíbrios ecológicos e causar crescimento excessivo de plantas e animais, levando à degradação da qualidade da água (eutrofização). Altas concentrações de amônia são tóxicos para os peixes e outras espécies de vida aquática. Nitrato e nitrito constituem-se em um problema de saúde pública, relacionados sobretudo à metemoglobinemia e à carcinogênese. O nitrogênio amoniacal pode esgotar o oxigênio dissolvido em águas naturais por meio de reações de nitrificação microbiana. (EPA, 2000).

Segundo Vymazal & Kröpfelová (2008), o nitrogênio pode estar presente também nos alagados construídos em várias formas orgânicas, incluindo ureia, aminoácidos, aminas, purinas e pirimidinas. Os mais importantes processos de conversão que acontecem em um sistema do tipo alagados construídos são: amonização (N orgânico $\rightarrow NH_4^+$), nitrificação ($NH_4^+ \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^-$), desnitrificação ($NO_3^- \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$), fixação biológica ($N_2 \rightarrow N$ orgânico), amonização de nitrato ($NO_3^- \rightarrow NH_4^+$), oxidação de amônia anaeróbica (ANAMMOX, $NH_4^+ \rightarrow N_2$) e volatilização ($NH_4^+ \rightarrow NH_3$). Esses processos de transformação do nitrogênio podem ser observados na Figura 7. 1- fixação de N_2 , 2- volatilização da amônia, 3- lixiviação, 4- amonificação (mineralização), 5- nitrificação, 6- absorção, 7- difusão do nitrato e desnitrificação subsequente, 8- nitrato-amonificação.

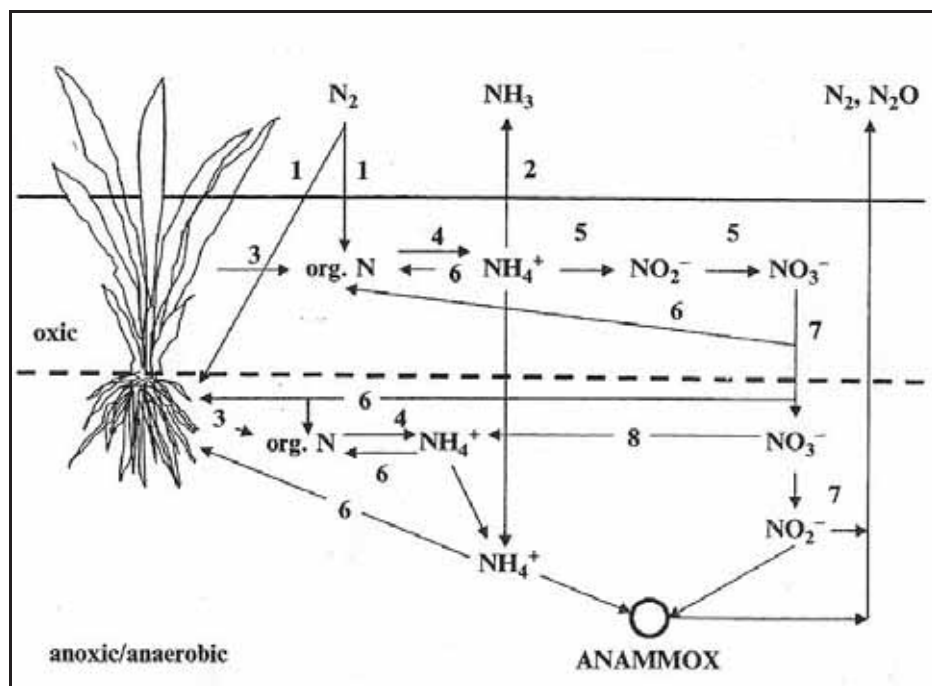


Figura 7 - Grandes transformações de nitrogênio em zonas aeróbias e anaeróbias (anóxica) em sistemas alagados. Fonte: VYMAZAL & KRÖPFELOVÁ (2008).

O ciclo do nitrogênio é bastante complexo e até as transformações mais simples são de difícil controle dentro de um alagado construído. A quantidade de nitrogênio removido ou transformado na fase aquosa de um alagado construído depende de fatores como clima, vegetação, profundidade e fluxo d'água. (BASTIVIKEN, 2006).

Hoffmann *et al.* (2011) afirmam que o crescimento da vegetação em alagados construídos leva à remoção de nutrientes, como nitrogênio e fósforo. A redução de amônia e fosfato de águas residuárias domésticas por plantas em crescimento é de cerca de 10-20%, no entanto os processos mais importantes para a remoção de nitrogênio são a nitrificação e desnitrificação realizadas por bactérias.

Há uma série de processos de físicos de separação que podem afetar as formas de nitrogênio em alagados construídos. Nitrogênio associado com sólidos em suspensão (nitrogênio orgânico) pode ser removido por muitos dos processos descritos anteriormente para a remoção de SST, incluindo floculação, sedimentação, filtragem, bem como os processos de interceptação. (EPA, 2000).

Platzer (1999 *apud* HOFFMANN *et al.*, 2011) destaca que, em alagados construídos de fluxo subsuperficial horizontal, a disponibilidade de oxigênio é limitada, de modo que não se pode esperar um bom processo de nitrificação; por outro lado, a desnitrificação pode ser muito eficiente, mesmo com baixa disponibilidade de carbono. O nitrato produzido pode ser reduzido em condições anóxicas por bactérias heterotróficas ao

nitrogênio molecular (N_2), e esse processo é chamado de desnitrificação. (HOFMANN *et al.*, 2011).

Em alagados construídos de fluxo subsuperficial vertical, o suprimento de oxigênio é suficiente, e a amônia pode ser oxidada por bactérias autotróficas para nitrato, processo chamado de nitrificação. Uma nitrificação quase completa com 90% de oxidação da amônia é comumente relatada em sistemas de fluxo vertical. (PLATZER, 1999; COOPER, 2005; PLATZER *et al.*, 2007 *apud* HOFFMANN *et al.*, 2011).

Os principais mecanismos de remoção de nitrogênio em alagados construídos são os processos sequenciais de amonificação, nitrificação e desnitrificação. (KADLEC *et al.*, 2000).

a) Amonificação

A amonificação é a formação de amônia (NH_3) durante o processo de decomposição da matéria orgânica dissolvida e particulada. A amônia formada é resultante da decomposição, tanto aeróbia quanto anaeróbia, da parte nitrogenada da matéria orgânica por organismos heterotróficos. (ESTEVES, 1998). O substrato é o principal local de realização desse processo.

Uma grande fração (até 100%) do nitrogênio orgânico é prontamente convertida em amônia e, cineticamente, a amonização ocorre mais rapidamente do que a nitrificação. O grau de velocidade da amonização em alagados depende da temperatura, do valor de pH, da proporção residual de C para N, dos nutrientes disponíveis no sistema, das condições do solo (como textura e estrutura), de enzimas extracelulares (como a protease) e das condições de biomassa microbiais e de redução da oxidação do solo. (VYMAZAL & KRÖPFELOVÁ, 2008).

b) Nitrificação

Geralmente, a nitrificação é definida como a transformação do amônio em nitrato por meio da sua oxidação biológica, tendo o nitrito como intermediário na sequência da reação. Essa definição tem suas limitações, especialmente no que se refere aos micro-organismos heterotróficos, mas é correta no que se refere aos autotróficos e às espécies dominantes. A nitrificação tem sido comumente associada à bactéria quimioautotrófica, entretanto hoje se reconhece que a nitrificação heterotrófica não só acontece como acontece de maneira significativa (VYMAZAL & KRÖPFELOVÁ, 2008).

Para Vymazal & Kröpfelová (2008), o fenômeno hoje chamado de nitrificação resulta na produção de nitrato de potássio (KNO_3), um fenômeno que foi descrito pela primeira vez na Bíblia. No século X, o nitrato de potássio era usado na produção de pólvora na China e na Europa e, no século XVI, havia registros da cultura de nitrato de potássio na Alemanha. Terra, esterco e limo eram misturados em trincheiras e aguados com urina e água de dejetos. As pilhas eram mantidas aeradas e o nitrato de potássio era extraído com água quente. Acreditava-se que o NO_3^- era formado pela reação química entre NH_4^+ e O_2 , com o solo agindo como um catalisador químico. Em 1870, Pasteur publicou que a formação de NO_3^- era microbiológica e semelhante à conversão de álcool em vinagre. A primeira comprovação científica de que a nitrificação era um processo biológico foi feita por Schloesing e Muntz em 1877.

Tipicamente, os nitrificantes são bactérias aeróbias, entretanto pesquisas mostram que eles podem ter um metabolismo anaeróbio.

A primeira etapa da nitrificação, descrita como sendo a transformação do amônio em nitrito, por meio de oxidação, tendo hidroxilamina e NO como intermediários, é atribuída à classe dos nitrosomonas e nitrosospira. (VYMAZAL & KRÖPFELOVÁ, 2008).



Na segunda etapa do processo de nitrificação, a transformação de nitrito em nitrato por meio de oxidação é feita por bactérias que oxidam nitritos, ou seja, pertencentes às famílias *Nitrobactérias*, *Nitrococcus* e *Nitrospira*. (VYMAZAL & KRÖPFELOVÁ, 2008).



Sendo a fórmula geral de nitrificação a combinação entre as duas equações:



Na presença de oxigênio dissolvido, os micro-organismos presentes na coluna d' água ou dentro do biofilme podem converter amônia em nitrito e nitrato em um processo de duas etapas. Nesse processo, cerca de 4.3g de O_2 são consumidos por grama de nitrogênio amoniacal oxidado a nitrato, e 7,14 g de alcalinante como CaCO_3 são utilizadas. A nitrificação depende da temperatura e do pH. (EPA, 1993 *apud* EPA, 2000).

A reação pode ocorrer em uma coluna de água aeróbia por bactérias em suspensão e dentro de qualquer biofilme aeróbio. O nitrato não é imobilizado por minerais do solo e permanece na coluna d' água ou nos poros dos sedimentos, podendo ser absorvido pelas plantas ou por micro-organismos, ou então pode sofrer redução do óxido de nitrogênio (redução de nitrato, conhecido como desnitrificação). (EPA, 2000).

c) Desnitrificação

A desnitrificação é um processo de decomposição anaeróbia em que a matéria orgânica é quebrada por meio de bactérias heterotróficas, que utilizam o nitrato comoceptor de elétrons no lugar do oxigênio. Esse processo ocorre em duas etapas (ESTEVES, 1998): a) o nitrato é reduzido a óxido nitroso (N_2O); o óxido nitroso é reduzido subsequentemente a nitrogênio gasoso (N_2).

Os produtos finais das duas etapas são gases emitidos na atmosfera. O baixo pH é inibidor da segunda etapa de desnitrificação, de forma que todo o nitrogênio é liberado na forma de óxido nitroso.

A reação de desnitrificação é irreversível na natureza e ocorre na presença de substratos orgânicos somente sob condições anaeróbias e anóxicas, em que o nitrogênio é usado como receptor de elétrons no lugar do oxigênio. A partir de estudos com culturas puras, são obtidas, cada vez mais, provas de que a redução de nitrato pode ocorrer na presença de oxigênio. Então, em solos inundados, a redução de nitrato também pode começar antes de o oxigênio ser completamente eliminado. (VYMAZAL & KRÖPFELOVÁ, 2008).

Segundo Vymazal & Kröpfelová (2008), a nitrificação e a desnitrificação são conhecidas por ocorrerem simultaneamente em sedimentos e solos inundados onde zonas aeróbias e anaeróbias existem. A importância das reações de nitrificação e desnitrificação em solos inundados rebaixados já era reconhecida em 1935 e foi confirmada na década de 1950. Alguns exemplos disso são os solos e sedimentos inundados que contenham uma camada superficial aeróbia sob uma camada anaeróbia, ou sob a rizosfera de raízes anaeróbias de uma planta de alagados construídos que cresce em um solo anaeróbio.

3.3.4 Fósforo

O fósforo na água apresenta-se, sobretudo, nas formas de *ortofosfato*, *polifosfato* e *fósforo orgânico*. Os *ortofosfatos* são diretamente disponíveis para o

metabolismo biológico sem necessidade de conversões a formas mais simples. As formas em que os *ortofosfatos* se apresentam na água (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , H_3PO_4) dependem do pH, sendo a mais comum na faixa usual de pH o HPO_4^{2-} . Os *polifosfatos* são moléculas mais complexas, com dois ou mais átomos de fósforo. (VON SPERLING, 2005).

Hoffmann *et al.* (2011) consideram que, na maioria das vezes, os alagados construídos não são projetados pensando na remoção de fósforo, já que, em muitos países em desenvolvimento, a remoção de fósforo não é considerada tão importante quanto a de outros poluentes presentes em águas residuárias. Se o excesso de fósforo em corpos d'água se tornou um problema importante, um primeiro passo poderia ser a proibição de detergentes que contêm esse componente, como tem sido feito, por exemplo, na Suíça.

Segundo Sriwiriyarat & Randall, 2005; Scholz, (2006 *apud* X. Q. TANG *et al.*, 2009), a remoção de fósforo tem sido feita basicamente por sistemas caros de purificação de águas residuárias, tais como lodos ativados e tecnologias para a remoção biológica de fósforo. A remoção de fósforo pode ser alcançada em alagados construídos por adsorção e precipitação, e uma pequena quantidade é também assimilada durante o crescimento da planta. Os autores estimam que a remoção de fósforo em relação ao crescimento da planta seja de até 10%, dependendo do clima, da planta, do tipo de água residuária, entre outros fatores. (HOFFMANN *et al.*, 2011).

Para maximizar a remoção de poluentes, especialmente no que diz respeito à remoção de fósforo e metais, a vegetação de zonas úmidas construídas deve ser cortada ou colhida com frequência durante a estação de crescimento. (ARIAS *et al.*, 2005).

Apesar de as macrófitas, o solo, os detritos e a biomassa serem importantes sumidouros de fósforo a curto prazo, o substrato é o principal dreno para o fósforo ao longo do tempo. (SAKADEVAN & BAVOR, 1997 *apud* X. Q. TANG *et al.* 2009).

3.4 Novas tecnologias

Na tentativa de produzir efluentes que atendam às exigências da legislação, ou que tenham características próprias para determinados usos, cada vez mais são desenvolvidos sistemas de alagados construídos que apresentam diferentes alternativas para o tratamento de águas residuárias.

Hoffmann *et al.* (2011) afirmam que, desde 1990, um sistema de fluxo subsuperficial vertical especial tem sido utilizado na França para o tratamento de esgoto bruto, chamado de "Sistema Francês". Um aspecto muito significativo sobre esse sistema

é que ele não exige uma etapa de pré-tratamento e, portanto, evita os problemas associados à produção de lodo e à geração de biogás não intencional.

O “Sistema Francês” é dividido em duas etapas. A primeira é formada por um sistema de leitos de fluxo vertical cheios de cascalho, que é projetado para realizar o pré-tratamento do esgoto bruto. O efluente pré-tratado passa, em seguida, pela segunda etapa de tratamento, que é um alagado de fluxo vertical preenchido com areia grossa. É recomendado dividir a primeira etapa para o tratamento de esgoto bruto em três leitos e a segunda etapa em dois. A Figura 8 apresenta um esquema do sistema Francês; da esquerda para direita, três leitos de fluxo vertical para pré-tratamento seguidos por dois leitos também de fluxo vertical para tratamento secundário, em Albondón, Espanha, para 800 habitantes. (MOLLE *et al.*, 2005 *apud* HOFFMANN *et al.*, 2011).



Figura 8 - Sistema Francês na Espanha. Fonte: Hoffmann *et al.* (2011).

Molle *et al.* (2005 *apud* HOFFMANN *et al.* 2011) relataram que a primeira fase do sistema apresenta uma eficiência de remoção de DQO de 80%, SST, de 86%, e Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), de 50%, sendo mais eficiente que qualquer processo de pré-tratamento convencional. Os sólidos retidos formam uma camada de lodo, o que limita a infiltração e melhora a distribuição de água na superfície. O acúmulo de lodo no leito filtrante da primeira fase é de cerca de 1,5 centímetros por ano. O segundo estágio é necessário para completar a nitrificação, para conseguir a remoção de patógenos e reduzir a DQO e SST. O sistema francês de tratamento de águas residuais remove tipicamente 90% de DQO, 96% de SST e 85% de NTK. Esse sistema é uma boa opção para pequenas comunidades por ser simples e de baixo custo. O sistema francês tem sido usado há mais

de 20 anos, e existem cerca de 500 alagados desse tipo construídos na França. Existem estações em uso também na Alemanha, Portugal e Espanha.

Com o aumento da demanda para alcançar efluentes totalmente nitrificados, no entanto sistemas de fluxo horizontal não são capazes de produzi-los por causa da baixa disponibilidade de oxigênio no leito; já nos sistemas de fluxo vertical, o transporte de oxigênio é grande e a nitrificação fica garantida. No processo de nitrificação, o nitrogênio amoniacal é transformado em nitrato, forma em que o nitrogênio pode ser assimilado pelas plantas. Apesar de o nitrato ser absorvido pela vegetação, essa parcela é mínima, restando ainda uma grande parte de nitrogênio total.

Com o propósito de remover o nitrogênio total das águas residuárias, têm-se criado sistemas de recirculação. Segundo Arias *et al.* (2005), é amplamente documentado que alagados construídos com fluxo vertical são eficientes para produzir efluentes bem nitrificados; no entanto o efluente tratado está saturado de oxigênio e tem uma baixa disponibilidade de carbono, além de que a remoção de nitrogênio total é limitada. Por meio da reciclagem de efluentes plenamente nitrificados à unidade de pré-tratamento (decantador), quando as condições são favoráveis para a desnitrificação, a remoção de nitrogênio total do esgoto pode ser melhorada.

Por outro lado, quando há interesse de utilizar o efluente na agricultura para irrigação de culturas, não há necessidade de retirar os nutrientes presentes no efluente. Nesse sentido, existem sistemas que praticam a recirculação no próprio leito de fluxo vertical visando à nitrificação, ou seja, transformação do nitrogênio amoniacal em nitrato para ser utilizado pelas plantas como fertilizante.

O esgoto pode ser considerado uma das águas mais ricas e produtivas para diversas culturas, uma vez que contém nitrogênio (5 - 7%) e fósforo (3 - 5%); em alagados construídos, ele pode ser usado como fertilizante. A viabilidade do cultivo de milho em um alagado construído de fluxo vertical com recirculação (ACFVR) foi avaliada por García-Pérez *et al.* (2011), ver Figura 09, em um estudo do esgoto gerado em uma igreja do município de LaGrange, Indiana (EUA), tratado por um sistema de alagado construído de fluxo subsuperficial vertical e recirculado no próprio leito, servindo de fertilizante para a cultura de milho, que foi plantada também no próprio leito. O efluente proveniente do sistema foi analisado para avaliar a qualidade da água. As eficiências de tratamento (remoção) foram as seguintes: coliformes fecais: 99,9%; demanda bioquímica de oxigênio: 98,4%; sólidos em suspensão totais: 95,6%; nitrogênio de amoniacal: 95,3%; nitrogênio total Kjeldhal: 94,7%; nitrogênio total: 79,5%; e fósforo total: 75, 5%. A remoção de

potássio foi relativamente baixa: 48,8%, e o rendimento do milho foi de 10.026 kg / ha. Esses resultados demonstram que um ACFVR pode ser uma alternativa de tecnologia sustentável para cultivar milho, fornecendo um mecanismo para remover os poluentes das águas residuárias e consequentemente reduzir os problemas de saneamento e melhorar os benefícios econômicos e sociais.

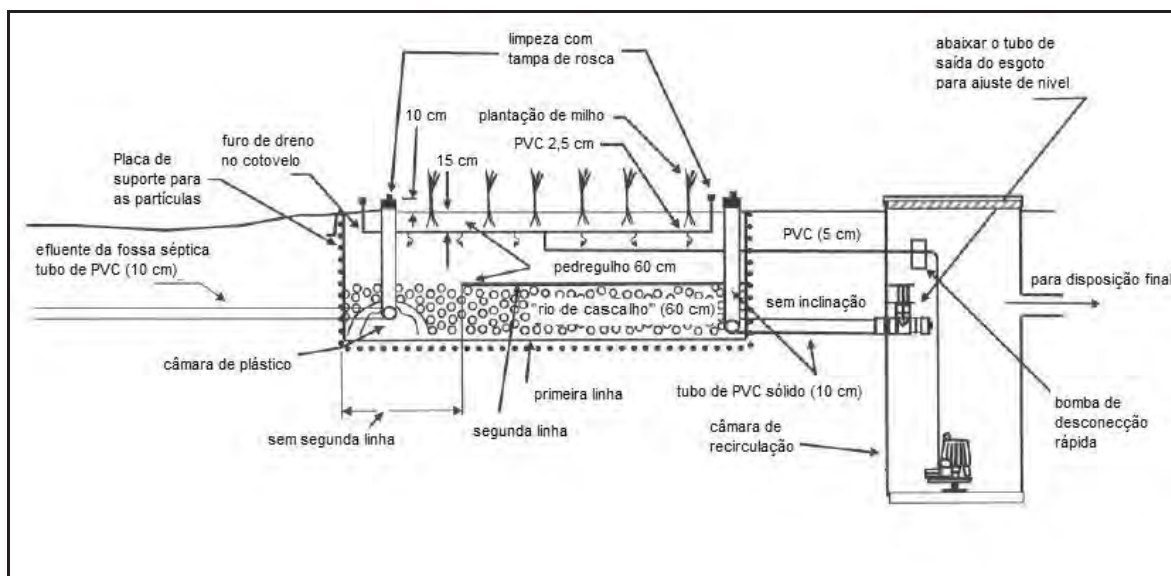


Figura 09 - Esquema do alagado construído de fluxo vertical com recirculação para irrigação de milho. Fonte: García-Pérez *et al.* (2009).

García-Pérez *et al.* (2009) sugerem que uma boa aplicação prática e ambiental para os alagados construídos de fluxo vertical com recirculação poderia ser a utilização de seus efluentes para irrigar *commodities* agrícolas, como o milho, para produzir biocombustível.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho serão relatados os aspectos de projeto e construção de todo o sistema, no entanto, para análise preliminar dos parâmetros físico-químicos e biológicos serão avaliados apenas os alagados construídos de fluxo vertical, uma vez que, os estudos sobre os alagados de fluxo horizontal estão sendo desenvolvidos por outro trabalho realizado no programa. Os dois projetos foram desenvolvidos em conjunto e fazem parte de um único projeto regular financiado pela FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

4.1 Área de estudo

Esta pesquisa foi desenvolvida para tratar o esgoto gerado no Departamento de Educação Física e Moradia Estudantil da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, na cidade de Bauru-SP. O campus do departamento de Educação Física fica separado dos outros cursos da Universidade pela Rodovia Comandante João Ribeiro de Barros (SP-225), Figura 10, sendo freqüentado por 327 pessoas entre alunos, professores e funcionários durante os dias letivos do ano. A Moradia Estudantil encontra-se em construção, com previsão de ocupação já para o início das aulas em fevereiro de 2012, inicialmente serão atendidos 32 alunos dos cursos de graduação da Universidade.

É importante observar que a freqüência, tanto no campus quanto na moradia, reduz significativamente no período de férias escolar nos meses de dezembro, janeiro e julho, acarretando na diminuição da produção de esgoto nesse período, tornando o sistema ocioso. Outro aspecto importante são as atividades de limpeza das salas, quadras e atividades laboratoriais que alteram significativamente a qualidade do esgoto, mesmo que de maneira pontual.

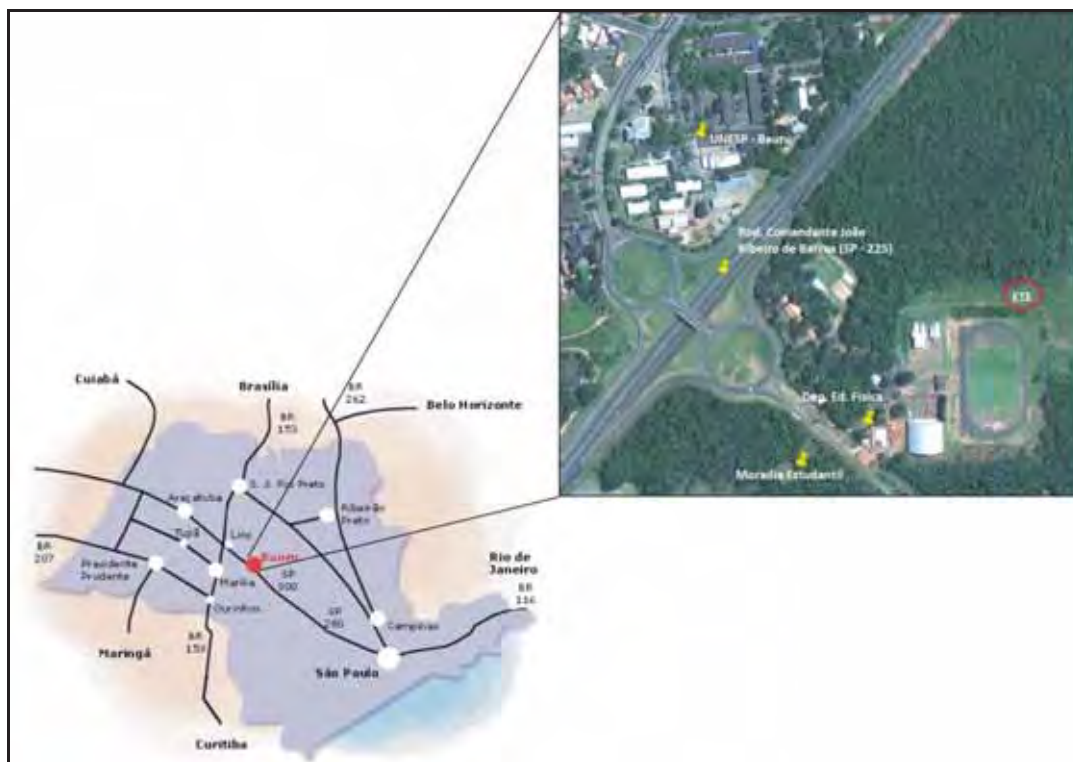


Figura 10 - Localização da área de estudo.

O município de Bauru situa-se no centro-oeste do estado de São Paulo, possui uma área de 667,681 Km² e uma população estimada de 343.937 habitantes, o bioma é composto por Cerrado e Mata Atlântica (IBGE, 2011). O clima é quente, pertencente ao tipo Aw (classificação climática de Koeppen), tropical chuvoso com inverso seco e mês mais frio com temperatura média superior a 18°C. O mês mais seco tem precipitação inferior a 60 mm e com período chuvoso que se atrasa para o outono (CEPAGRI, 2011).

4.2 Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)

Os dados utilizados para calcular a quantidade de esgoto a ser tratado na ETE foram baseados em estudos anteriores realizados no campus principal da Universidade, esses dados referem-se ao consumo de água no campus durante os anos de 2004 a 2009, segundo esse acompanhamento definiu-se que um aluno consome em média 25L de água por dia, já para professores e funcionários o consumo passa a ser de 50L/dia.

O Departamento onde o projeto foi desenvolvido atende 300 alunos, 20 professores e 07 funcionários. Conforme Von Sperling (2005) a vazão média de entrada do esgoto no sistema pode ser calculada pela seguinte formula:

$$Q_{d_{\text{méd}}} = \text{Pop} * Q_{\text{PC}} * R / 1000 \text{ (m}^3/\text{dia)}$$

Onde:

$Q_{d_{\text{méd}}} = \text{vazão doméstica média de esgotos (m}^3/\text{dia)}$

$Q_{\text{PC}} = \text{quota per capita de água (L/hab.dia)}$

$R = \text{coeficiente de retorno esgoto/água. Sendo que um valor usualmente adotado tem sido o de 80\% (R=0,8).}$

Para calcular a vazão média de entrada do esgoto no sistema foram feitos dois cálculos, sendo um para faculdade e outro para Moradia Estudantil, essa divisão foi necessária, pois o consumo per capita de água varia de um estabelecimento para outro.

Ainda conforme Von Sperlin (2005) o consumo de água típico de um alojamento, no caso, a Moradia Estudantil é de 80-150 L/hab.dia. Assim, foram adotados os valores de Q_{PC} de 150 L/unid.d para moradia, 50 L/hab.dia para professores e funcionários, e 25 L/hab.dia para alunos.

Portanto:

$$Q_{d_{\text{méd}}} \text{ moradia} = 32 * 150 * 0,8 / 1000$$

$$Q_{d_{\text{méd}}} \text{ moradia} = 3,84 \text{ m}^3/\text{dia}.$$

$$Q_{d_{\text{méd}}} \text{ faculdade}_1 = 27 * 50 * 0,8 / 1000$$

$$Q_{d_{\text{méd}}} \text{ faculdade}_1 = 1,08 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$Q_{d_{\text{méd}}} \text{ faculdade}_2 = 300 * 25 * 0,8 / 1000$$

$$Q_{d_{\text{méd}}} \text{ faculdade}_2 = 6 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$Q_{d_{\text{méd}}} \text{ total} = Q_{d_{\text{méd}}} \text{ moradia} + Q_{d_{\text{méd}}} \text{ faculdade}_{1, 2}$$

$$Q_{d_{\text{méd}}} \text{ total} = 10,92 \approx 11,00 \text{ m}^3/\text{dia}.$$

Com a estimativa de que a ETE receberia 11,00 m³/dia de esgoto, foram realizados os cálculos para carga volumétrica e carga orgânica.

Carga Volumétrica:

A carga volumétrica é calculada através da vazão recebida pela área total destinada ao tratamento. Portanto, foi considerada a área útil de cada leito para encontrar a carga volumétrica do sistema.

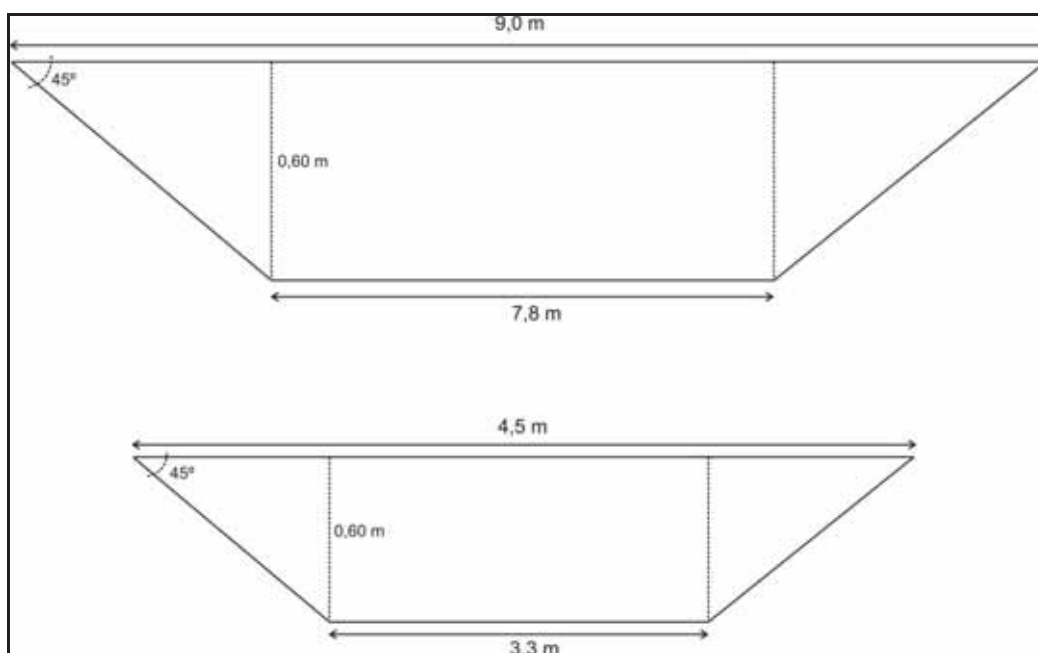


Figura 11 - Corte dos alagados construídos de fluxo horizontal.

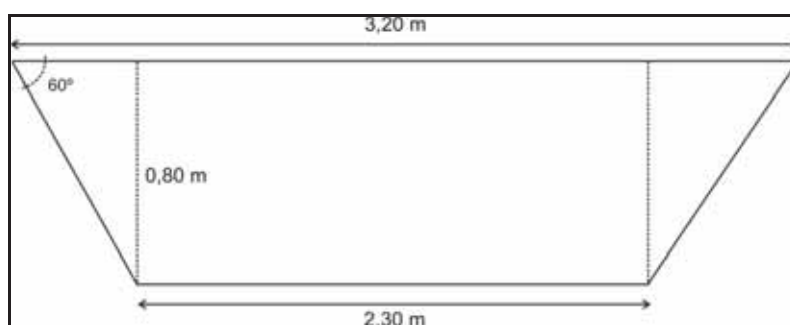


Figura 12 - Corte dos alagados construídos de fluxo vertical.

Assim, temos como área útil dos alagados construídos de fluxo horizontal e vertical $98,28 \text{ m}^2$ e $22,86 \text{ m}^2$, respectivamente, totalizando uma área útil de $121,14 \text{ m}^2$.

$$\text{Carga Volumétrica} = Q_{\text{entrada}} / \text{Área útil}$$

$$\text{Carga Volumétrica} = 11 \text{ m}^3 / 121,14 \text{ m}^2$$

$$\text{Carga Volumétrica} = 0,0908 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ ou } 90,80 \text{ L}/\text{m}^2.$$

Carga Orgânica:

Na pesquisa realizada no campus principal nos anos de 2004 a 2009 foi constatado também que cada pessoa produz cerca de $300 \text{ mg}/\text{L.dia}$ de DBO. Isso significa

que para uma produção de 11.000 L/dia de esgoto são produzidos 3.300g/dia de DBO, a divisão da DBO pela área total útil nos permite encontrar a quantidade recebida por m^2 , que neste caso é de 27,24 g/m^2 .

Considerando que cada pessoa produz em média 54 g de carga orgânica diariamente, podemos concluir que o sistema utiliza de 1,98 m^2 de área para o tratamento de cada habitante. Portanto os alagados construídos de fluxo horizontal são responsáveis por 1,60 m^2/hab (80,81%) e os alagados de fluxo vertical por 0,38 m^2/hab (19,19%).

A ETE é composta por quatro etapas de tratamento (preliminar, primário, secundário e terciário). Os alagados construídos recebem o efluente de um decantador, portanto, o resíduo que entra nos leitos já recebeu um pré-tratamento. A Figura 13 representa a planta da Estação de Tratamento.

a. Tratamento preliminar

Esta etapa do tratamento compreende um sistema de gradeamento responsável por reter sólidos grosseiros, uma peneira estática hidrodinâmica, fenda de 0,7mm com a finalidade de reter sólidos mais finos que possam causar entupimentos no sistema e uma caixa de distribuição com três divisórias para distribuição do efluente nos três alagados de fluxo horizontal, de forma que todos recebam o mesmo volume.

b. Tratamento primário

O tratamento primário é composto por um decantador destinando-se à remoção de sólidos em suspensão e sólidos flutuantes; conseqüentemente, uma parcela da matéria orgânica em suspensão contida no esgoto fica retida nessa etapa do tratamento. O decantador possui capacidade para 5.500 L.

c. Tratamento secundário

Esta fase é constituída por três leitos de alagados construídos de fluxo horizontal que visam, especialmente, à remoção da DBO e de SST.

d. Tratamento terciário

O tratamento terciário é uma etapa adicional de tratamento, formada por três leitos de alagados construídos de fluxo vertical com recirculação, que tem o objetivo de melhorar o processo de nitrificação do sistema, reduzindo assim a quantidade de nitrogênio amoniacal.

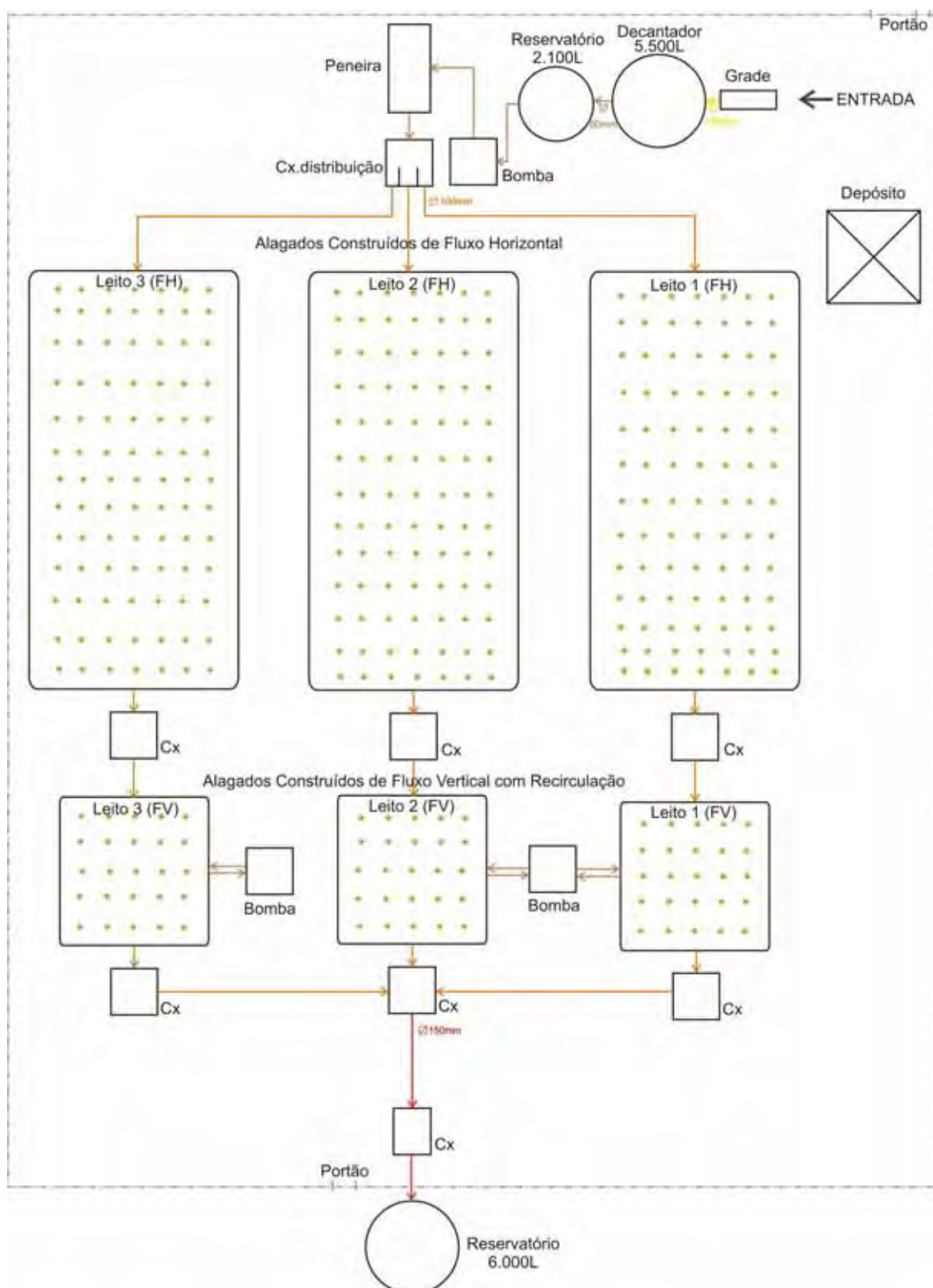


Figura 13 - Planta da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE).

4.3 Alagados construídos

a) Alagados construídos de fluxo subsuperficial horizontal

Os alagados construídos de fluxo horizontal funcionam como tratamento secundário e são responsáveis pela remoção da DBO e SST. Os leitos possuem dimensões externa de 9,0 x 4,5 m e área útil de 98,28 m² com profundidade média de 0,60 m. Os materiais utilizados como substrato foram pedrisco, areia grossa, pedra e isopor em flocos.

b) Alagados construídos de fluxo subsuperficial vertical com recirculação (ACFVR)

O efluente de cada leito de fluxo horizontal é encaminhado para os leitos de fluxo vertical com recirculação, passando por uma caixa de passagem. Esse conjunto de alagados construídos é considerado como um processo de tratamento terciário, pois proporciona um tratamento complementar ao efluente da etapa anterior.

O conjunto de ACFVR é formado por três leitos com medidas externa de 3,2 x 3,2 m e área útil de 22,86 m² cada um, a profundidade média dos leitos é de 0,80m e os substratos utilizados no preenchimento são os mesmos do sistema anterior, pedrisco, areia grossa, pedra e isopor em flocos.

Substrato

Os materiais normalmente utilizados como substrato em alagados construídos são areia grossa e fina, pedra, pedregulhos e pedriscos. Devido ao alto valor comercial desses materiais, no presente projeto, utilizaremos o Poliestireno expandido (isopor) em flocos, como um dos materiais para formação do substrato.

Oliveira *et al.* (2006a) realizou um experimento para investigar a influência da macrófita *Typha spp* em alagados construídos. O estudo utilizou biorreatores, obtendo resultados comparativos entre dois tipos de meio suporte: pedrisco e poliestireno expandido (isopor) reciclado e biorreator sem a macrófita. Os seguintes parâmetros foram analisados: DBO, DQO, amônia, nitrato, nitrito, fósforo total e condutividade, demonstrou um eficiência de remoção coerente com a literatura. A remoção de DBO e amônia no biorreator com pedrisco e planta foi de 91,06% e 96,40% respectivamente; para o biorreator com isopor e planta, a redução foi de 94,01% e 97,80%, respectivamente, e para o biorreator com isopor, mas sem planta, a redução foi de 85,74% e 81,47%,

respectivamente. Os dados iniciais mostram que o poliestireno é viável para substituir o pedrisco, pois uma maior eficiência na remoção de carga orgânica e amônia foi observada. Também foi possível verificar que a planta paralelamente colabora com cerca de 10 a 15% no processo de remoção dessas substâncias.

Portanto, cada leito será preenchido com substratos diferentes, para a avaliação do desempenho de cada um deles, no processo de tratamento do esgoto. A distribuição dos materiais pode ser observada na Figura 14.

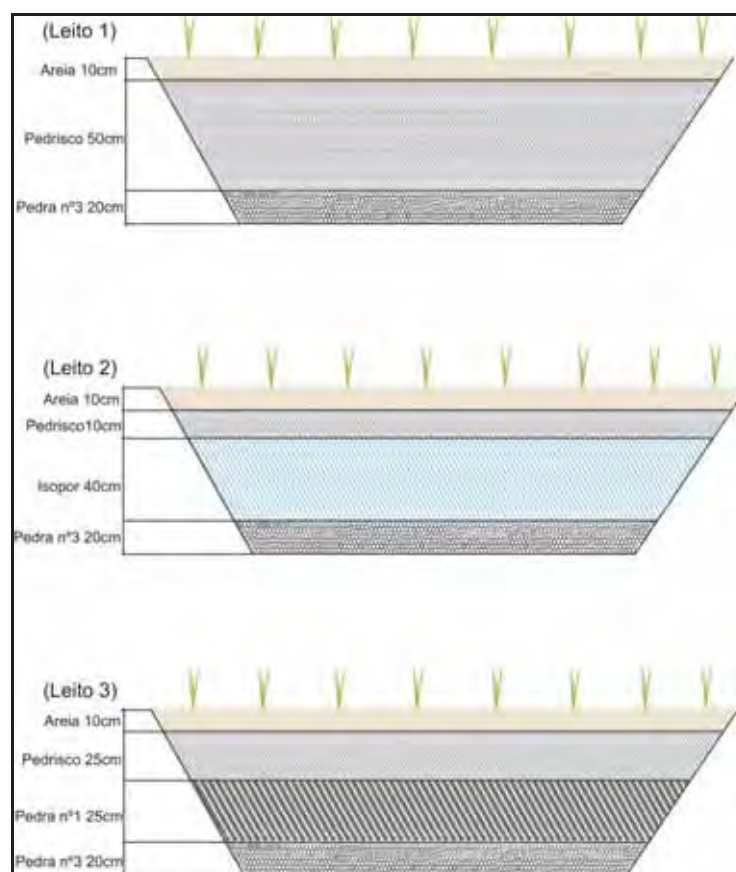


Figura 14 - Esquema representativo dos leitos com diferentes substratos.

Vegetação

A planta escolhida para compor todos os leitos da ETE foi o capim Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*). Em alguns países da Europa, como a Itália, o Vetiver tem sido usada na conservação de solos agrícolas, estabilização de locais inclinados, reabilitação de solos salinos e contaminados usada como barreira efetiva para controle de erosão e sedimentos, e mais recentemente no tratamento da água (TRUONG & HART, 2001).

No Brasil, apesar da produção de vetiver ainda ser pequena e haver poucos estudos sobre seus diversos usos, as perspectivas são animadoras em relação à utilização da planta no tratamento de águas residuárias.

Segundo Pereira (2006), o uso do capim vetiver para tratamento de esgoto apresenta as seguintes justificativas, vinculadas a suas características:

- Tem crescimento denso, formando uma barreira viva e permeável, que atua como um filtro muito eficiente, retendo sedimentos grossos e finos;
- Apresenta sistema de raízes profundas, extensas e penetrantes, prevenindo que esses resíduos penetrem no solo ou reduzindo a possibilidade de penetração, o que poderia comprometer a contaminação do lençol freático;
- Altamente resistente a enfermidades, pragas e fogo;
- Tolerante a uma grande variação de temperatura, de -9 até 50° C;
- Tolerante a secas e inundações prolongadas;
- Alta tolerância a solos muito ácidos, básicos, salinos, sódicos e com altos níveis de magnésio;
- Alta tolerância a elementos como Al, Mn, As, Cd, Ni, Pb, Hg, Se e Zn nos solos;
- Tolerante a herbicidas e praguicidas;
- Muito eficiente na absorção de N, P, Hg, Cd e Pb dissolvidos em corpos hídricos;
- Consumo de maior volume de água quando comparado com plantas aquáticas como *Typha spp*, *Phragmites australis* e *Schoenoplectus validus*;
- Habilidade de recuperação rápida após distúrbios ambientais, e;
- Não apresenta estolões subterrâneos e suas flores são estéreis, não representando risco de se tornar uma planta invasora.

Segundo Srivastava *et al.* (2008) pesquisas tem demonstrado uma enorme capacidade do capim vetiver em remover N e P de águas residuárias. O vetiver pode suportar taxas de N: 10.000 Kg ha⁻¹ ano⁻¹ e P: 1.000ha⁻¹ ano⁻¹ (LAVANIA *et al.*, 2004 apud SRIVASTAVA *et al.*, 2008).

Diante dessas considerações, acreditamos que o capim vetiver apresente resultados satisfatórios quando utilizado nos alagados construídos. Na Figura 15 está apresentado uma muda do capim utilizado no plantio dos leitos.



Figura 15 - Muda do Capim Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*).

O plantio das mudas foi esquematizado da seguinte forma:

- Alagados Construídos de fluxo horizontal, treze linhas e sete colunas totalizando 91 mudas por leito;
- Alagados Construídos de fluxo vertical, 05 linhas e 05 colunas o que equivale a 25 mudas por leito.

Sistema de recirculação

Os alagados construídos de fluxo horizontal são eficazes na remoção de DBO e SST, no entanto esse sistema apresenta baixa eficácia na eliminação de compostos de nitrogênio, em decorrência da baixa disponibilidade de oxigênio no leito. Desse modo, o sistema de fluxo vertical com recirculação apresenta as características ideais para remoção de compostos de nitrogênio, uma vez que oferece as condições adequadas (disponibilidade de oxigênio) para que ocorra a nitrificação, processo em que o nitrogênio amoniacal é convertido em nitrato.

Assim, foi elaborado um sistema de recirculação, que consiste em recircular parte do esgoto que entra no leito de fluxo vertical. O esgoto é distribuído na superfície do leito por tubos de esgoto de 100 mm de diâmetro perfurados com uma broca de 10 mm. Ao fundo foram instalados dois sistemas de tubulação, um com a função de drenar parte do esgoto e enviá-lo para a recirculação (tubo de 60 mm) através de uma Bomba Centrífuga do tipo Caracol 1CV e outro responsável pela descarga do efluente final (tubo de esgoto

100 mm). O efluente recirculado é aspergido na superfície do leito, por micro aspersores instalados em tubos de PEAD de 20 mm azul. (Figura 16 e Figura 17).

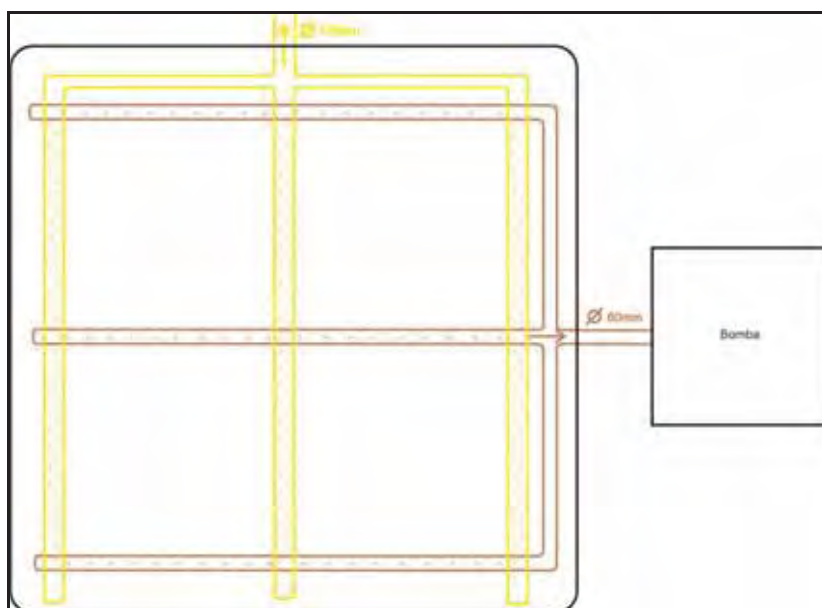


Figura 16 - Planta de fundo dos Alagados Construídos de fluxo vertical.

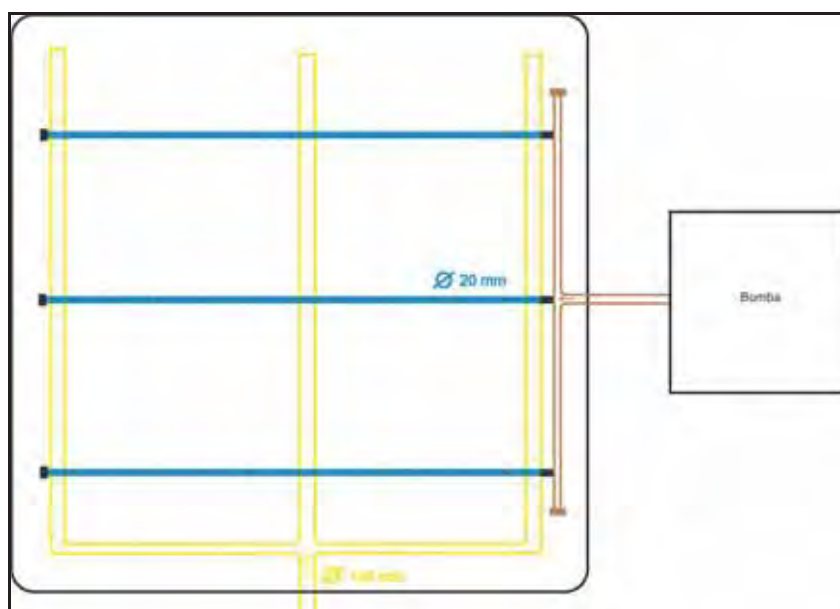


Figura 17 - Planta de superfície dos Alagados Construídos de fluxo vertical.

4.4 Orçamento Preliminar

Após a definição do projeto, foi realizado um levantamento prévio do custo para implantação do sistema e manutenção, chegando ao valor de R\$ 79.692, 05 esse total inclui Material Permanente, Material de Consumo e Serviços de Terceiros, existe ainda uma quantia disponível de R\$ 14.374, 80 referente à Reserva Técnica. O projeto foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) através da aprovação de proposta de um Projeto Regular para construção e monitoramento da ETE.

Vale ressaltar que se trata de uma pesquisa, portanto alguns itens que compõem o sistema fazem parte de testes que serão feitos e acabam por encarecer o projeto. Esses itens podem ser substituídos por opções de menor valor se houver necessidade.

4.5 Construção

Para a realização da obra de construção da Estação de Tratamento de Esgoto foi necessário escolher um local apropriado, limpar o terreno e contratar de mão de obra terceirizada. Na escolha da área foram levados em consideração os seguintes fatores:

- Área extensa;
- Inclinação natural do terreno (desde a futura moradia até a área escolhida), permitindo o escoamento do esgoto apenas por gravidade;
- Fácil acesso;
- Distância até a moradia aceitável em projeto;



Figura 18 - Área escolhida para execução do projeto.

A execução da obra teve início no mês de abril de 2011, sendo concluída em outubro do mesmo ano, as etapas da construção estão discriminadas e descritas a seguir.

Levantamento Topográfico e Terraplenagem

Primeiramente foi realizado um levantamento topográfico do local onde a ETE seria instalada. Com base nesse levantamento, foi possível conhecer os níveis do terreno, sendo necessário realizar um serviço de terraplenagem com ajuda de um caminhão do tipo “Bob cat” para ajustar o terreno em dois níveis possibilitando o escoamento do esgoto por gravidade ao longo do sistema (Figura 19).



Figura 19 - Terreno após a execução do serviço de terraplenagem.

Execução dos Alagados Construídos

As dimensões dos alagados construídos foram marcadas no terreno com piquetes e com ajuda de uma retro escavadeira deu-se início ao processo de escavação dos leitos. O acerto final, conforme a forma desejada foi realizada manualmente pelo pessoal responsável pela mão de obra. Também foram escavadas canaletas no entorno dos alagados para fixação da geomembrana (Figura 20).



Figura 20 - Execução dos Alagados Construídos.

Execução da caixa de distribuição, caixas de passagem e tubulações

Após passar pelo decantador e pela peneira estática, o efluente é dividido em três partes iguais e encaminhado para os alagados de fluxo horizontal, essa distribuição é feita em um reservatório chamado de caixa de distribuição que foi construída de alvenaria com dimensão de 1,0 x 1,0 m e possui duas divisórias de alvenaria, também foi instalado um sistema de medição de vazão por meio de um vertedor triangular feita de chapa acrílica (Figura 21).



Figura 21 - Execução da caixa de distribuição.

As caixas de passagem também foram construídas de alvenaria com dimensão de 1,0 x 1,0 m. Nessas caixas foram instaladas mangueiras maleáveis presa com

abraçadeiras metálicas à tubulação principal, a mangueira funciona como um controlador de nível dos leitos. A tubulação principal utilizada nos leito e nas caixas é do tipo tubo OCRE JEI 100 mm (Figura 22 e Figura 23).



Figura 22 - Execução das caixas de passagem.



Figura 23 - Instalação das tubulações.

Instalação da geomembrana

A geomembrana é um material indispensável na execução dos leitos de alagados construídos, principalmente, quando este é inserido no próprio solo. Esse procedimento evita que ocorram infiltrações que venham contaminar o solo e atingir o lençol freático.

Para impermeabilização do solo foram utilizadas: a) camada de geotêxtil não tecido, para proteger a geomembrana de possíveis falhas do solo; b) camada de geomembrana de 0,80 mm; e c) camada de geotêxtil não tecido para proteger a geomembrana dos substratos que compõe o leito (Figura 24).



Figura 24 - Instalação da geomembrana e geotêxtil não tecido.

Instalação do Sistema de Recirculação

Para instalação da tubulação de fundo do sistema foram utilizados tubos de esgoto de 100 mm e tubos de 60 mm. Na superfície foi usada uma mangueira PEAD de 20 mm que foi perfurada e nela colocados dois tipos de aspersores. O sistema foi instalado manualmente com ajuda de uma furadeira com broca de 10 mm para fazer os furos nas tubulações tanto de chegada quanto de recolhimento e saída (Figura 25).

Preenchimento dos Leitos

Para preenchimento dos leitos de fluxo horizontal foi colocada uma camada vertical de pedra nº 3 e posteriormente foram espalhados manualmente em camadas horizontais os outros substratos. No caso do isopor em flocos, acima da camada deste foi instalada uma manta de “sombrite 35%” para impedir que o pedrisco que viria por cima não se misturasse ao isopor (Figura 26).

Todos os leitos de fluxo vertical receberam uma camada de pedra nº 3 ao fundo para melhorar a drenagem e proteger a tubulação, logo em seguida foram colocados os

outros materiais. O procedimento para colocação do isopor em flocos foi o mesmo que nos alagados de fluxo horizontal (Figura 26).



Figura 25 - Instalação do Sistema de Recirculação.



Figura 26 - Preenchimento dos leitos com os substratos.

Plantio do Capim Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*)

Para o plantio do capim foram feitas covas de aproximadamente 15 cm de profundidade com auxílio de uma pá de jardinagem. Foi necessário dois dias para o plantio

das mudas, no primeiro foram colocadas todas as mudas nos alagados de fluxo vertical e no dia seguinte nos alagados de fluxo horizontal. No momento do plantio as mudas estavam com aproximadamente 20 cm de altura (Figura 27).



Figura 27 - Plantio das mudas do Capim Vetiver.

Execução de outras etapas

No local foi construído um depósito para armazenamento dos materiais utilizados na pesquisa, feito de alvenaria, nas dimensões de 2,0 x 2,0 m (Figura 28).



Figura 28 - Depósito para armazenamento de materiais.

O sistema de gradeamento utilizado para reter sólidos mais grossos é a primeira etapa da ETE e foi feita toda de alvenaria com medidas de 1,20 x 0,40 m. A grade foi feita de ferro galvanizado e recebeu uma mão de tinta esmalte para proteção contra corrosão (Figura 29).



Figura 29 - Detalhe da construção do sistema de gradeamento.

Foram adquiridos três reservatórios de PEAD de volume igual a 5.500L, 2.100L e 6.000 L. No momento da instalação os recipientes foram cheios com água e por fora foi colocado areia e água até obter o assentamento adequado, esse procedimento é necessário para que tanto a pressão interna quanto a externa não cause danos ao material. Finalmente depois de enterrados os reservatórios de 5.500L e 2.100L receberam uma proteção externa feita com aduelas de concreto (Figura 30).



Figura 30 - Instalação dos Reservatórios.

A Peneira Estática Hidrodinâmica foi adquirida da empresa Flowmec-Equipamentos e Sistemas Ltda., essa peça é confeccionada de aço inox e possui fenda de 0,7 mm. No local foi construída uma plataforma de alvenaria com medidas 1,90 x 0,90 m para fixação da peneira e para que o efluente que se espalhe seja recolhido (Figura 31).



Figura 31 - Peneira Estática Hidrodinâmica.

4.6 Dados Meteorológicos

Os dados de precipitação pluviométrica e de temperatura média mensal do ar durante os três primeiros meses de funcionamento (outubro, novembro e dezembro) da ETE foram disponibilizados pelo Instituto de Pesquisas Meteorológicas – IPMET,

localizado na cidade de Bauru – SP. Os dados foram coletados na estação meteorológica automática do IPMet/UNESP, cuja posição é dada pelas seguintes coordenadas: 22,355° S e 49,03° W e altitude de 620 m.

4.7 Monitoramento do Sistema e Análise dos Resultados

O monitoramento do sistema teve dois enfoques principais: a avaliação do comportamento da ETE em relação aos aspectos construtivos e a análise preliminar dos parâmetros físico-químicos e biológicos dos pontos de entrada e saída dos alagados construídos de fluxo vertical.

O monitoramento dos aspectos construtivos foi realizado através de visitas semanais a ETE onde todos os acontecimentos foram anotados e fotografados.

Para análise preliminar dos parâmetros físico-químicos e biológicos foram realizadas análises semanais dos parâmetros descritos na Tabela 3. As análises foram realizadas no Laboratório de Águas Residuárias (LAR) – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” - Faculdade de Engenharia de Bauru, conveniada ao Departamento de Água e Esgoto de Bauru – DAE Bauru. Todos os métodos utilizados para análises das amostras são reconhecidos pela APHA, 2005.

Nos primeiros meses de funcionamento da ETE a coleta das amostras foi realizada semanalmente no período da manhã, por volta das 09 horas e os locais de coleta foram os seguintes:

Ponto 01: Decantador, como existe grande variabilidade do esgoto que chega a ETE ao longo do dia, tanto em aspectos qualitativos quanto quantitativos, ficou definido como melhor local para caracterizar o esgoto de entrada do sistema.

Ponto 02: Caixa de passagem após o primeiro leito de fluxo horizontal.

Ponto 03: Caixa de passagem após o segundo leito de fluxo horizontal.

Ponto 04: Caixa de passagem após o terceiro leito de fluxo horizontal.

Ponto 05: Caixa de passagem após o primeiro leito de fluxo vertical.

Ponto 06: Caixa de passagem após o segundo leito de fluxo vertical.

Ponto 07: Caixa de passagem após o terceiro leito de fluxo vertical.

Ponto 08: Caixa de saída do efluente final.

Como nesse trabalho serão estudados apenas os alagados construídos de fluxo vertical, os pontos de coleta que serão avaliados e apresentados no trabalho são 02, 03, 04, 05, 06, 07.

Para a verificação do comportamento inicial dos leitos de fluxo vertical em relação ao efluente, os resultados encontrados para os diversos parâmetros estudados foram apresentados na forma de gráficos, para cada um dos parâmetros, levando em consideração o ponto de entrada e o ponto de saída dos leitos.

Os resultados encontrados foram submetidos a um teste estatístico (teste-t) para esclarecer se há significância ou não no tratamento de um leito em relação aos outros. Esses testes foram realizados utilizando o software Microsoft Excel como suplemento.

Tabela 3 - Análises realizadas e seus respectivos métodos e equipamentos.

PARÂMETRO	MÉTODO	EQUIPAMENTO UTILIZADO
Condutividade	Potenciométrico	Condutivímetro THERMO – Modelo 3 STAR
pH	Potenciométrico	pHmetro ORION – Modelo 310
Alcalinidade	Titulométrico	pHmetro ORION – Modelo 310
Oxigênio Dissolvido “in situ”	Potenciométrico	Oxímetro YSI – Modelo 95 (sonda)
Temperatura da água “in situ”	Potenciométrico	Oxímetro YSI – Modelo 95 (sonda)
DBO	Barométrico	Aparelho de DBO HACH – Modelo DBO Track
DQO	Colorimétrico	Digestão: Reator HACH – Modelo COD; Leitura: Espectrofotômetro HACH – Modelo DR 2500
Sólidos Totais Dissolvidos	Potenciométrico	Condutivímetro THERMO – Modelo 3 STAR
Cor	Colorimétrico	Espectrofotômetro HACH – Modelo DR 2500
Nitrogênio Total Kjeldahl	Colorimétrico	Digestão: Reator HACH – modelo Digesdahl; Leitura: Espectrofotômetro HACH – modelo DR 2500
Nitrogênio Amoniacal	Colorimétrico	Condutivímetro THERMO – ORION modelo 720
Nitrato	Colorimétrico	Espectrofotômetro HACH – Modelo DR 2500
Nitrito	Colorimétrico	Espectrofotômetro HACH – Modelo DR 2500
Fosfato	Colorimétrico	Espectrofotômetro HACH – Modelo DR 2500
Fósforo Total	Colorimétrico	Digestão: Reator HACH – modelo Digesdahl; Leitura: Espectrofotômetro HACH – modelo DR 2500

4.8 Cálculo das Taxas de Eficiência de Remoção

4.8.1 *Taxa de eficiência de remoção total*

Para calcular a taxa de eficiência de remoção total no sistema de alagados construídos foi calculado a diferença entre a concentração de entrada (Ponto 01) e de saída (Ponto 08), dividido pela concentração de entrada (Ponto 1) e multiplicado por 100 para ser expressa em porcentagem.

$$\text{Eficiência Total} = C_{\text{ponto 1}} - C_{\text{ponto 8}} / C_{\text{ponto1}} \times 100$$

4.8.2 *Taxa de eficiência de remoção parcial*

A taxa de eficiência parcial será aplicada apenas nos alagados de fluxo vertical para acompanhar as taxas de remoção apenas desses leitos. Assim temos as seguintes formulas:

$$\text{Eficiência Parcial}_{\text{leito1}} = C_{\text{ponto2}} - C_{\text{ponto5}} / C_{\text{ponto2}} \times 100$$

$$\text{Eficiência Parcial}_{\text{leito2}} = C_{\text{ponto3}} - C_{\text{ponto6}} / C_{\text{ponto3}} \times 100$$

$$\text{Eficiência Parcial}_{\text{leito3}} = C_{\text{ponto4}} - C_{\text{ponto7}} / C_{\text{ponto4}} \times 100$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Orçamento Final

Com a execução da ETE e início das análises de acompanhamento, foi possível montar o orçamento final com todos os gastos utilizados no projeto. Pode-se observar nas Tabelas 4, 5 e 6 que a implantação do projeto ficou muito próximo do esperado, sendo que no orçamento preliminar foi estimado um valor de R\$ 79. 692,05 e com base no orçamento final foram gastos R\$ 78.298,86.

Tabela 4 – Relação de itens de Material Permanente.

Item	Quantidade	Total (R\$)
Canal Aberto tipo Calha Parshall	1	336,00
Transmissor e indicador de vazão por ultra som + sensor SE-02A511	1	3.704,00
Peneira Estática Hidrodinâmica	1	7.170,00
Bomba Centrífuga – Caracol 1CV	3	1.410,00
Bomba Auto Escorvante – Trifásica 1CV	1	1.500,00
Painel comando proteção (Bombas)	1	1.600,00
Valor Total de Material Permanente		15.720,00

Tabela 5 – Relação de itens de Material de Consumo.

Item	Quantidade	Total (R\$)
Material de Construção	-	11.255,42
Tubulação	-	5.318,30
Geomembrana 5,90 x 100 m 0,80mm	1	3.521,66
Reservatórios PEAD 5.000 L , 2.100 L e 6.000 L	3	5.853,71
Geotêxtil não tecido 2,3 x 100 m	1	1.418,00
Sombrite 35% 50 x 1,5 m	1	149,35
Material para Laboratório e Reagentes	-	7.912,62
EPS em flocos	15m ³	1.560,00
Muda de Vetiver	700	1.400,00
Micro ASP. Amanco	-	85,00
Chapa dobrada	3	690,00
Mangueira Jardim	-	54,80
Grama Batatais (semente)	-	150,00
Aduela de Concreto	3	300,00
Valor Total de Material de Consumo		39.668,86

Tabela 6 – Relação de itens de Serviços de Terceiros.

Item	Total (R\$)
Pedreiro	11.200,00
Mão de obra para escavação e acerto de terra	5.840,00
Instalação da Geomembrana	1.400,00
Acerto de terra e colocação dos substratos nos leitos	1.360,00
Instalação da Calha	230,00
Plantio de grama	350,00
Instalação das bombas	150,00
Serviços executado com “Bob cat” (16 horas)	1.280,00
Instalação da parte elétrica	1.100,00
Valor Total de Serviços de Terceiros	22.910,00

5.2 Vegetação

As mudas do capim vetiver foram transplantadas para os leitos nos dias 21 e 22 de setembro de 2011 e antes de serem replantadas foi realizado um procedimento de corte para que todas as mudas fossem do mesmo tamanho, também foram escolhidas as plantas que tinham as características semelhantes, como: folhas, cor e espessura.

Até o dia 26/10/2011, dia em que a ETE começou a receber esgoto, as plantas foram nutridas apenas com água da chuva e regas. As 348 mudas plantadas nos leito de fluxo horizontal e vertical se adaptaram bem sendo que não houve nenhuma perda, no entanto, desde o início é notável o melhor desenvolvimento da vegetação nos leitos que utilizam o isopor em flocos como substrato (Figura 32).

Logo que a ETE entrou em funcionamento, foi observado que existia um vazamento no terceiro alagado de fluxo vertical, assim, foi necessário retirar toda a vegetação e substrato do leito para reparar o problema. Após a reparação foram utilizadas mudas do vetiver que estavam plantadas ao redor da ETE em solo normal para recompor o leito, essas plantas foram novamente selecionadas para que tivessem as mesmas características.

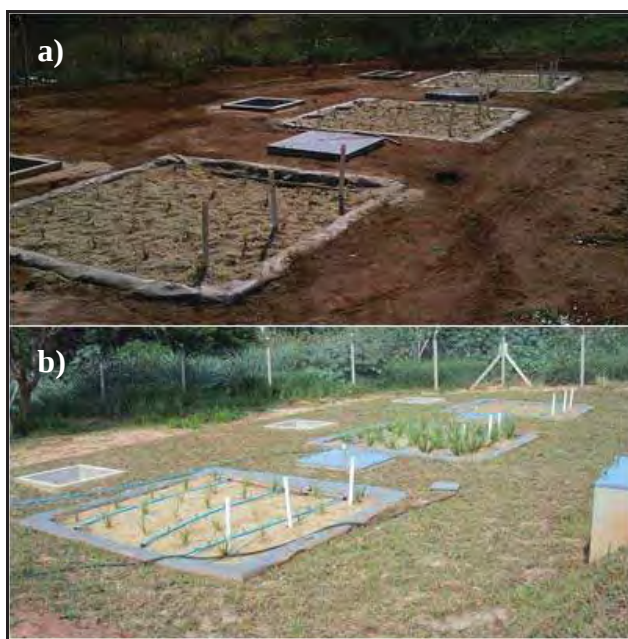


Figura 32 - Desenvolvimento do Capim Vetiver (a) 22/09/2011 (b)14/12/2011.

5.3 Substratos

Segundo Zanella (2005) um material para ser considerado como meio suporte adequado deve atender a alguns requisitos básicos como ser leve, biológica e

quimicamente inerte, possuir grande área específica, possibilitar a colonização de microorganismos e vegetais, apresentar formato não achatado, ter preço reduzido, etc.

Na busca por um material que atendesse a esses requisitos, escolhemos utilizar o isopor. Inicialmente a intenção era reutilizar pedaços de isopor que seriam descartados, realizando um processo de moagem para criar pequenos flocos, essa idéia não teve sucesso, pois encontramos grande dificuldade para conseguir material e o processo de moagem era muito desgastante. Para evitar atrasos no projeto preferimos comprar o isopor já processado em flocos, por conta disso tivemos o gasto de R\$ 1.560,00 por 15m³ do produto.

Outro problema encontrado em relação ao isopor foi no momento de preencher os leitos, como o material é muito leve, tivemos grande trabalho devido ao vento. Uma boa solução encontrada foi colocar uma cobertura de sombrite 35% e inserir o isopor por debaixo desta cobertura, assim, evitamos que o material se espalhasse e que a camada de pedrisco colocada acima não se misturasse ao isopor. No entanto, como comentado no item 5.2 nos leitos que utilizaram isopor como substrato o capim vetiver se desenvolveu significativamente melhor.

Para os outros substratos usados no projeto pedrisco, pedra nº 1, pedra nº 3 e areia não houve dificuldades para encontrá-los já que se trata de materiais disponíveis no mercado de construção civil. A única dificuldade foi para preencher os leitos, já que são materiais bastante pesados.

5.4 Manutenção do Sistema

Após o início de operação da ETE foram necessários realizar alguns reparos, o primeiro fato ocorrido foi uma chuva forte que ocasionou a entrada de enxurrada nos leitos de fluxo vertical, esses leitos ficam em um nível mais baixo, portanto, a chuva “carregou” terra para dentro deles. Para resolver temporariamente o problema, foram escavadas canaletas forçando com que a água da chuva escoasse para outro local sem atingir os leitos.

Posteriormente, foi plantado grama no entorno dos alagados de fluxo vertical para aumentar a proteção do sistema. O plantio de grama estava previsto para ser realizado com sementes, mas, devido às fortes chuvas essa alternativa foi mal sucedida.

Como comentado no item 5.2 o terceiro leito dos alagados de fluxo vertical apresentou um problema de vazamento no início de funcionamento da ETE. Foi observado a entrada de efluente no leito, entretanto, não era observado a saída do mesmo na caixa de

passagem. Esse leito foi desativado e todo efluente que era lançado nele passou a ser lançado no segundo leito, esse procedimento é possível, pois todas as caixas de passagem foram construídas de forma a possibilitar o fechamento da tubulação principal, nesse caso, o líquido escoar pela abertura lateral, direcionado a caixa de passagem ao lado. Devido ao problema observado, as seis primeiras coletas realizadas para análise dos parâmetros físico-químicos e biológicos não puderam ser realizadas nos pontos 04 e 07, antes e depois do terceiro leito. Para encontrar o vazamento toda a vegetação e parte do substrato foram removidos, o problema foi ocasionado por uma má vedação entre a geomembrana e a tubulação de entrada, sendo facilmente resolvido e permitindo com que o leito voltasse a operar normalmente.

Outro fato que necessitou de uma atividade de controle foi a propagação de plantas invasoras, principalmente, no terceiro leito de fluxo horizontal. Como isso pode interferir no tratamento foi feita a retirada dessa vegetação, atividade que provavelmente terá que ser realizada rotineiramente.

5.5 Dados Meteorológicos

Na Figura 33 é possível visualizar a variação da chuva (mm) e da temperatura média do ar (C°) ao longo do mês de outubro de 2011. Durante esse período a precipitação acumulada do mês foi de 209,0 mm sendo que a maior precipitação ocorreu no dia 25 com 42,2 mm. A maior temperatura do mês foi de 36,2 C° no dia 01 e a menor de 13,5 C° no dia 18.

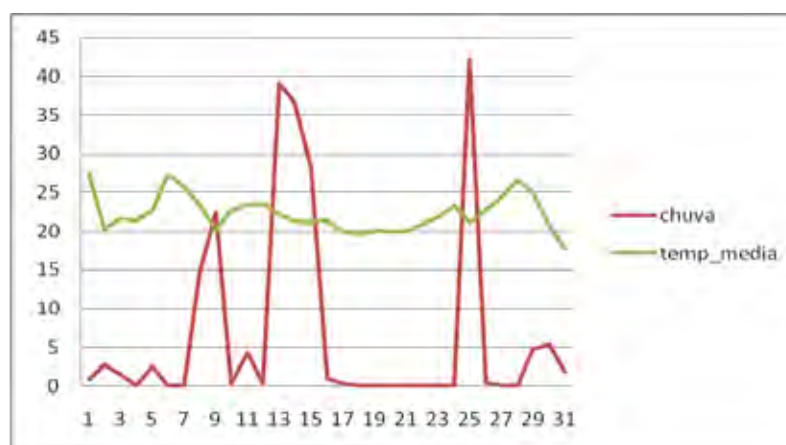


Figura 33 - Sequência de chuva (mm) e temperatura média do ar (C°) no mês de Outubro/2011.

Na Figura 34 é possível visualizar a variação da chuva (mm) e da temperatura média do ar (C°) ao longo do mês de novembro de 2011. Durante esse período a precipitação acumulada do mês foi de 109,0 mm sendo que a maior precipitação ocorreu no dia 15 com 43,2 mm. A maior temperatura do mês foi de 33,6 C° no dia 26 e a menor de 12,1 C° no dia 3.

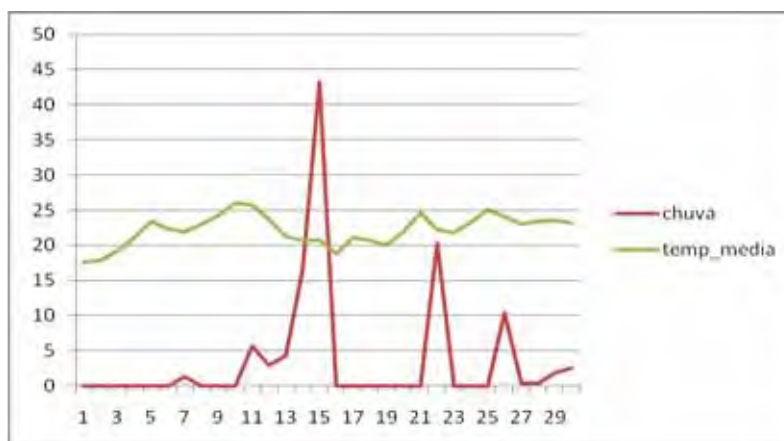


Figura 34 - Sequência de chuva (mm) e temperatura média do ar (C°) no mês de Novembro/2011.

Na Figura 35 é possível visualizar a variação da chuva (mm) e da temperatura média do ar (C°) ao longo do mês de dezembro de 2011. Durante esse período a precipitação acumulada do mês foi de 133,9 mm sendo que a maior precipitação ocorreu no dia 9 com 43,4 mm. A maior temperatura do mês foi de 33,6 C° no dia 13 e a menor de 13,5 C° no dia 3. Lembrando que nesse mês só foi possível obter os dados até o dia 19.

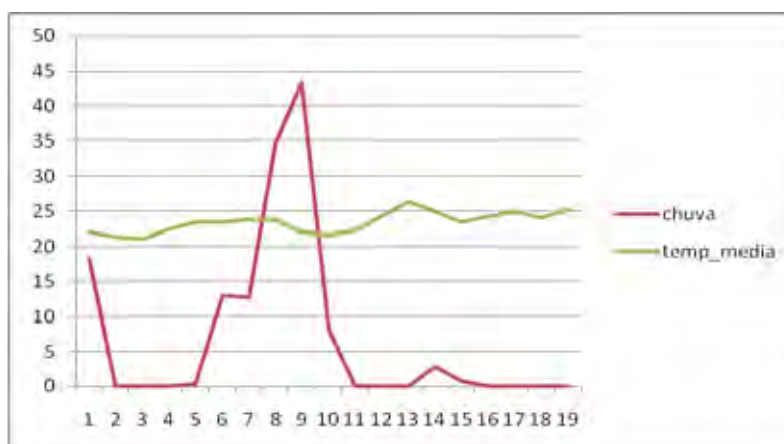


Figura 35 - Sequência de chuva (mm) e temperatura média do ar (C°) no mês de Dezembro/2011.

5.6 Interpretação dos dados

As variações dos parâmetros durante o período estudado estão dispostas em gráficos e as médias e desvio padrão estão organizados em tabelas. Foram estudados os Pontos 02, 05, 03 e 06 referentes aos leitos 1 e 2 do sistema de fluxo vertical. O terceiro leito não foi avaliado devido aos problemas de vazamento relatados no item anterior.

Foram aplicadas as taxas de eficiência total e parcial, assim como, a aplicação do teste estatístico (teste-t) para verificar se há diferença significativa ou não entre os parâmetros estudados entre os dois leitos.

5.6.1 *Oxigênio Dissolvido*

Os valores médios e desvios padrão encontrados para o oxigênio dissolvido nos pontos 02, 05, 03 e 06 estão representados na Tabela 7, enquanto a Figura 36 apresenta a variação dos valores obtidos no período de execução do experimento.

As Figuras 37 e 38 apresentam a variação do oxigênio dissolvido durante o período da pesquisa nos leitos 1 e 2 de fluxo vertical.

Analisando os valores do oxigênio dissolvido verifica-se que os valores médios mantiveram-se praticamente constantes nos dois leitos.

Ao aplicarmos o teste estatístico (teste-t) para comparar o leito 1 (Ponto 05) com o leito 2 (Ponto 06) encontramos que há diferença significativa entre os leitos 1 e 2 de fluxo vertical em relação ao comportamento do oxigênio dissolvido.

Tabela 7 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para OD (mg L^{-1}).

Ponto de Coleta	Leito 1		Leito 2	
	Ponto 02	Ponto 05	Ponto 03	Ponto 06
Média	2,74	3,41	3,12	3,94
Desvio Padrão	0,67	1,63	1,59	1,88

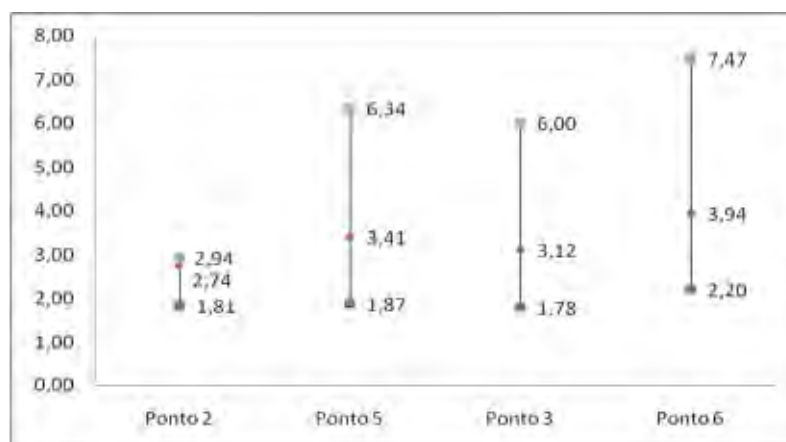


Figura 36 - Variação dos valores de oxigênio dissolvido (mg L^{-1}) .

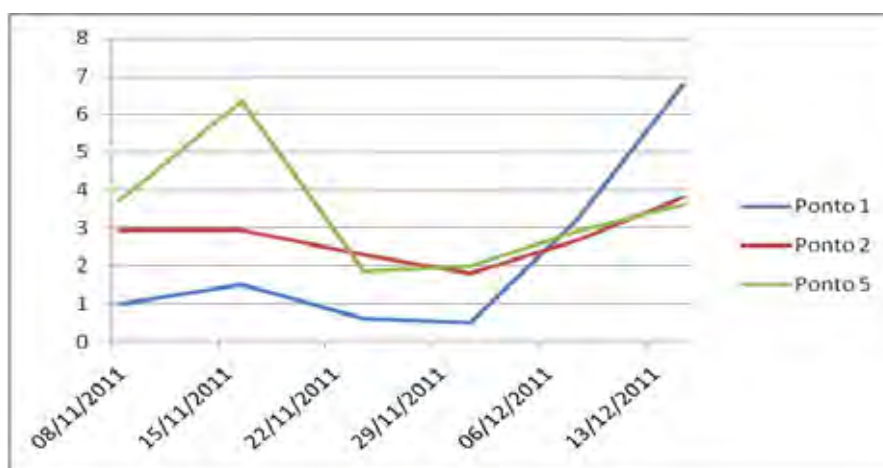


Figura 37 – Variação temporal do oxigênio dissolvido no leito 1 de fluxo vertical.

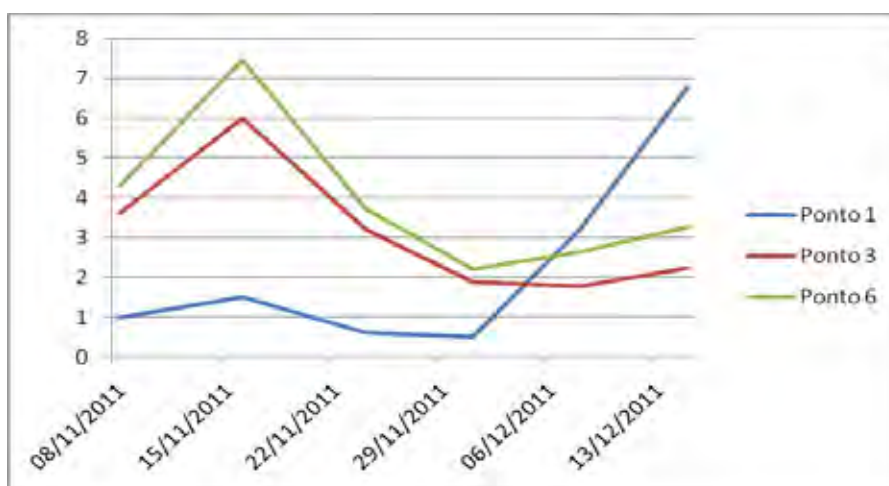


Figura 38 - Variação temporal do oxigênio dissolvido no leito 2 de fluxo vertical.

5.6.2 *Demanda Química de Oxigênio (DQO)*

A Tabela 8 apresenta os valores médios e desvio padrão encontrada para DQO nos pontos estudados, enquanto a Figura 39 demonstra as variações de concentração da DQO no período de amostragem.

As Figuras 40 e 41 apresentam a variação da DQO durante o período da pesquisa nos leitos 1 e 2 de fluxo vertical.

Ao calcularmos as taxa de eficiência de remoção total para o sistema encontramos o valor de 81,01%, já para taxa de eficiência parcial dos leitos 1 e 2 de fluxo vertical foi encontrado os valores de 21,09% e -53,78% respectivamente.

Aplicando o teste estatístico chegamos à conclusão de que há significância de remoção da DQO para os leitos 1 e 2.

Tabela 8 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para DQO (mg L^{-1}).

Ponto de Coleta	Leito 1		Leito 2	
	Ponto 02	Ponto 05	Ponto 03	Ponto 06
Média	37,17	29,33	24,17	37,17
Desvio Padrão	39,71	36,08	36,60	37,05

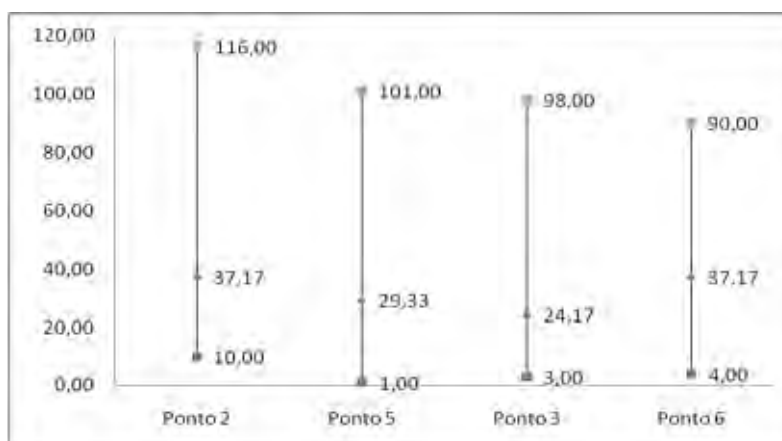


Figura 39 - Variação dos valores de DQO (mg L^{-1}).

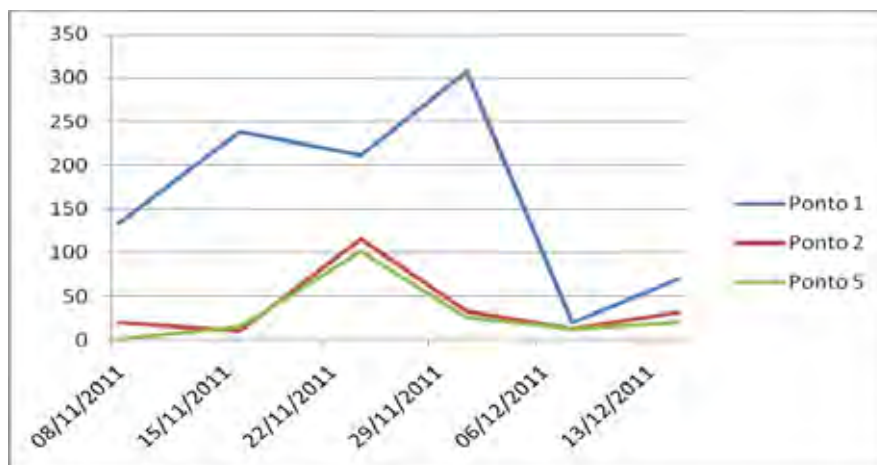


Figura 40 - Variação temporal da DQO no leito 1 de fluxo vertical.

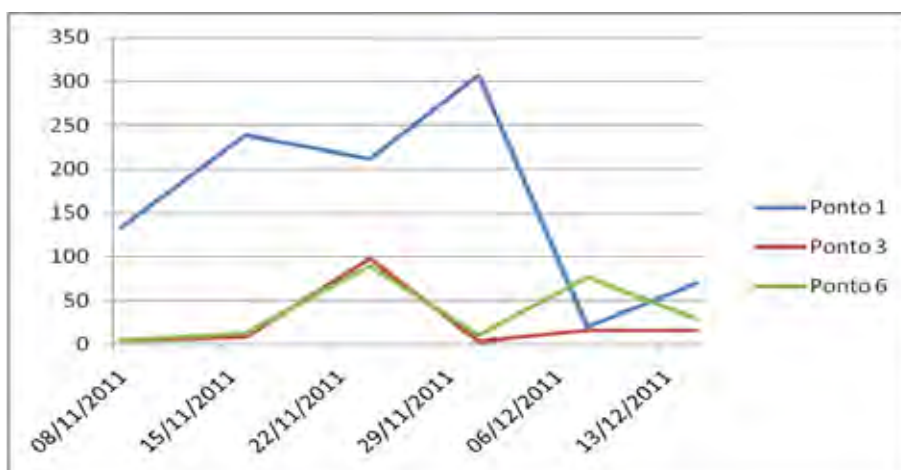


Figura 41 - Variação temporal da DQO no leito 2 de fluxo vertical.

5.6.3 ***Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)***

Os valores médios e o desvio padrão encontrados para DBO estão organizados na Tabela 9, já as variações desse parâmetro ao longo da pesquisa podem ser observadas na Figura 42.

As Figuras 43 e 44 apresentam a variação da DBO durante o período da pesquisa nos leitos 1 e 2 de fluxo vertical.

Verifica-se que houve redução de DBO em relação ao Ponto 02 para o Ponto 05 (leito 1) fator observado também do Ponto 03 para o 04 (leito 2).

Aplicando o teste-t conclui-se que há diferença significativa entre um leito de fluxo vertical em relação ao outro.

A eficiência de remoção total do sistema foi de 49,80%, enquanto a eficiência parcial foi para o leito 1 de 4,61% e para o leito 2 de 48,65%.

Tabela 9 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para DBO (mg L^{-1}).

Ponto de Coleta	Leito 1		Leito 2	
	Ponto 02	Ponto 05	Ponto 03	Ponto 06
Média	13,0	12,4	24,15	12,4
Desvio Padrão	14,42	9,64	23,17	7,89

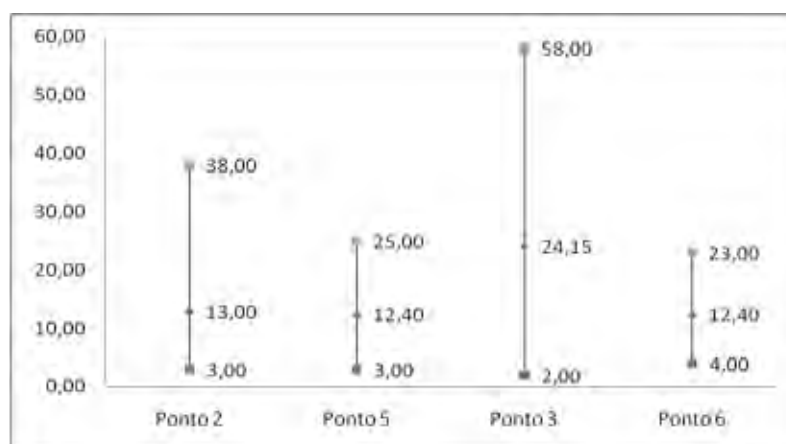


Figura 42 - Variação dos valores de DBO (mg L^{-1}) .



Figura 43 - Variação temporal da DBO no leito 1 de fluxo vertical.

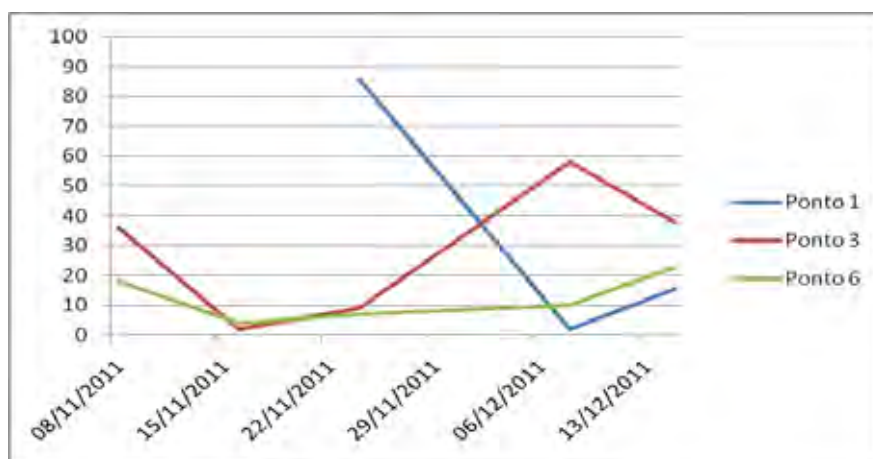


Figura 44 - Variação temporal da DBO no leito 2 de fluxo vertical.

5.6.4 pH

Os valores médios e o desvio padrão encontrados para o pH nos pontos 02, 05, 03 e 06 estão representados na Tabela 10, enquanto a Figura 45 apresenta a variação dos valores obtidos no período de execução do experimento.

As Figuras 46 e 47 apresentam a variação do oxigênio dissolvido durante o período da pesquisa nos leitos 1 e 2 de fluxo vertical.

Analisando os valores do pH no período amostrado verifica-se que os valores médios variaram muito pouco nos dois leitos.

Ao aplicarmos o teste estatístico (teste-t) podemos concluir que existe diferença significativa entre os leitos.

Tabela 10 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para pH.

Ponto de Coleta	Leito 1		Leito 2	
	Ponto 02	Ponto 05	Ponto 03	Ponto 06
Média	7,6	7,5	6,99	7,04
Desvio Padrão	0,48	0,49	0,53	0,61

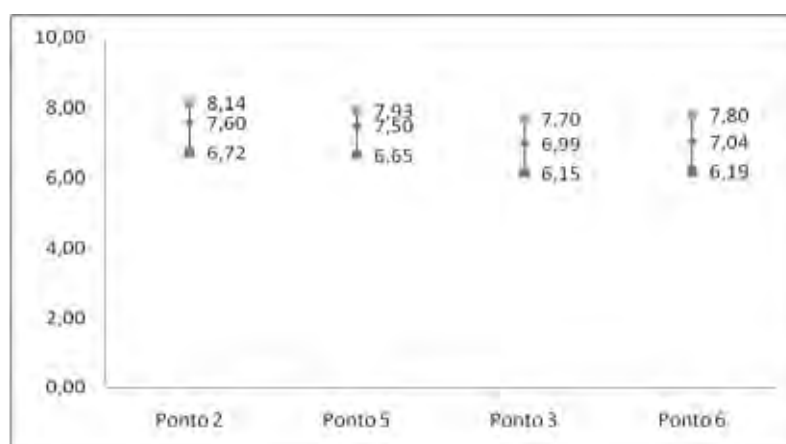


Figura 45 - Variação dos valores de pH .

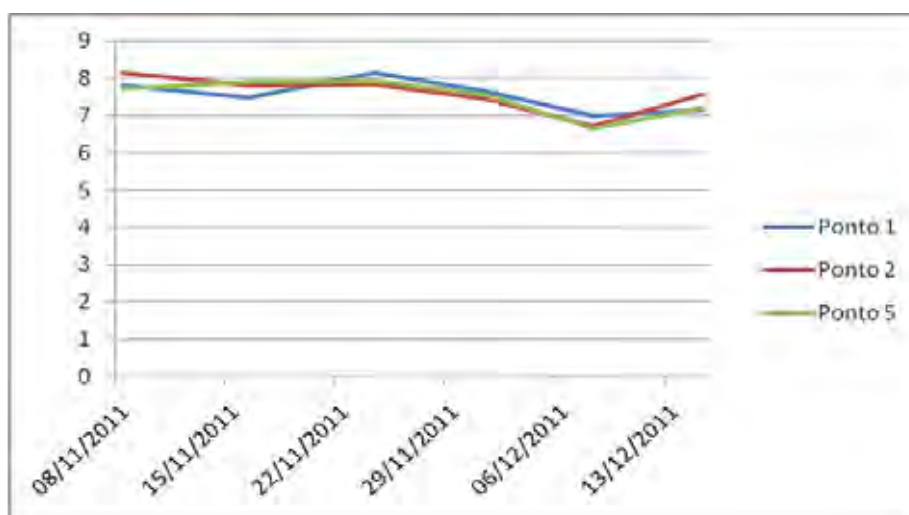


Figura 46 - Variação temporal do pH no leito 1 de fluxo vertical.

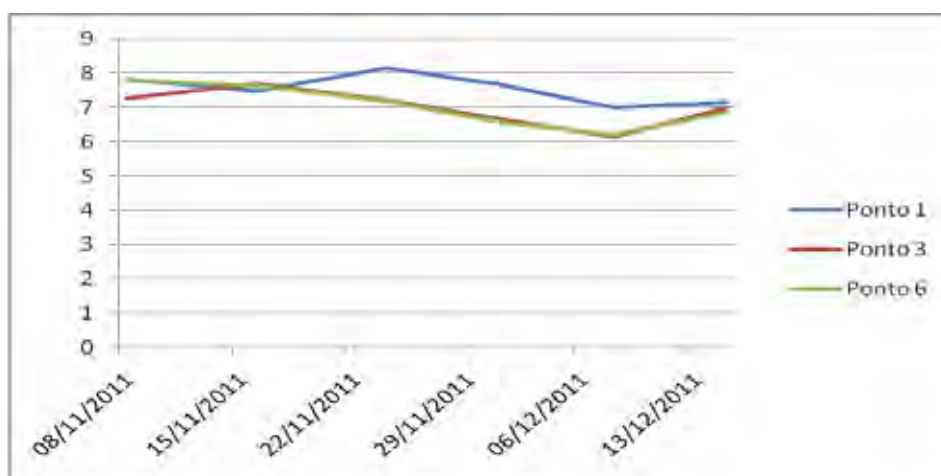


Figura 47 - Variação temporal do pH no leito 2 de fluxo vertical.

5.6.5 Alcalinidade

Os valores médios e o desvio padrão da alcalinidade nos pontos 02, 05, 03 e 06 podem se observados na Tabela 11, já a variação deste parâmetro está representada na Figura 48.

As Figuras 49 e 50 apresentam a variação da alcalinidade durante o período da pesquisa nos leitos 1 e 2 de fluxo vertical.

Observando a Figura 37 é visível que houve uma leve redução nas taxas de alcalinidade entre os pontos de entrada e saída dos leitos 1 e 2. No entanto, ao calcularmos a taxa de eficiência de remoção total encontramos o valor de -1,05% para o sistema inteiro, já para eficiência parcial no leito 1 o valor encontrado foi de 1,50% e no leito 2 de 17,91%.

Para este parâmetro também houve diferença significativa de redução em relação aos leitos 1 e 2.

Tabela 11 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para alcalinidade (mg L⁻¹ de CaCo₃).

	Leito 1		Leito 2	
Ponto de Coleta	Ponto 02	Ponto 05	Ponto 03	Ponto 06
Média	188,68	185,84	169,6	139,21
Desvio Padrão	46,58	37,28	43,65	41,31

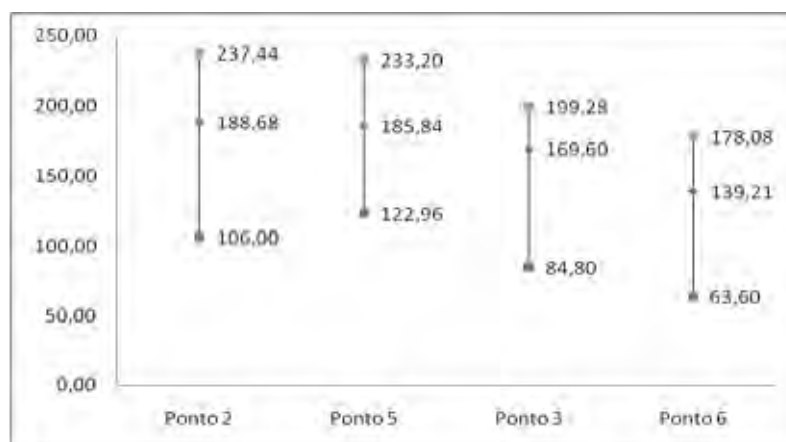


Figura 48 - Variação dos valores de alcalinidade (mg L⁻¹ de CaCo₃) .

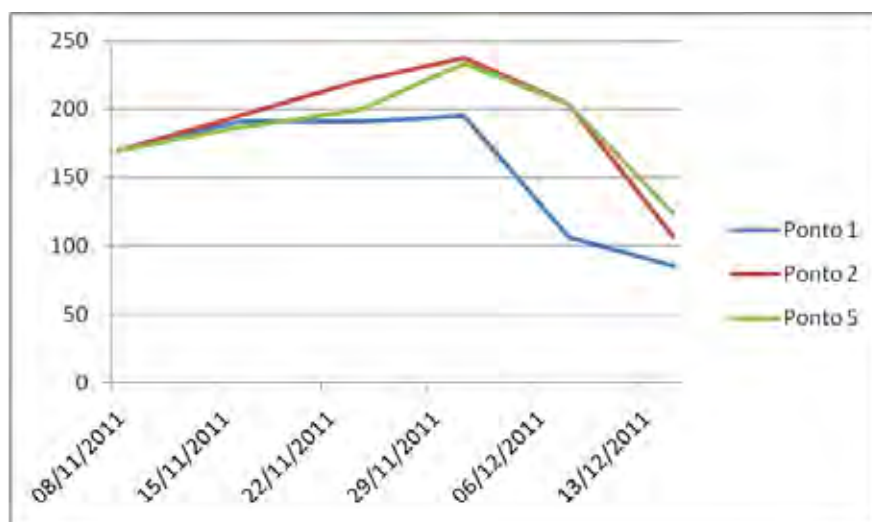


Figura 49 - Variação temporal da alcalinidade no leito 1 de fluxo vertical.

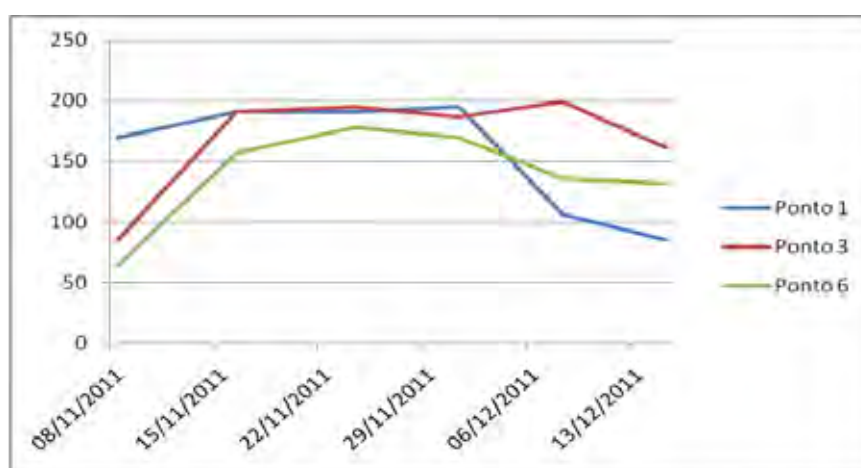


Figura 50 - Variação temporal da alcalinidade no leito 2 de fluxo vertical.

5.6.6 Condutividade

A Tabela 12 apresenta os valores médios e desvio padrão encontrada para condutividade nos pontos estudados, enquanto a Figura 51 demonstra as variações de concentração da condutividade no período de amostragem.

As Figuras 52 e 53 apresentam a variação da condutividade durante o período da pesquisa nos leitos 1 e 2 de fluxo vertical.

As eficiências de remoção encontradas para este parâmetro foram de 38,48% para o sistema todo, 3,82% para o leito 1 e 12,86% para o leito 2.

Aplicando o teste estatístico chegamos à conclusão de que há significância de diferença da condutividade para os leitos 1 e 2.

Tabela 12 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para Condutividade ($\mu\text{S cm}^{-1}$).

	Leito 1		Leito 2	
Ponto de Coleta	Ponto 02	Ponto 05	Ponto 03	Ponto 06
Média	397,9	382,68	452,4	394,2
Desvio Padrão	170,80	132,81	75,28	90,08

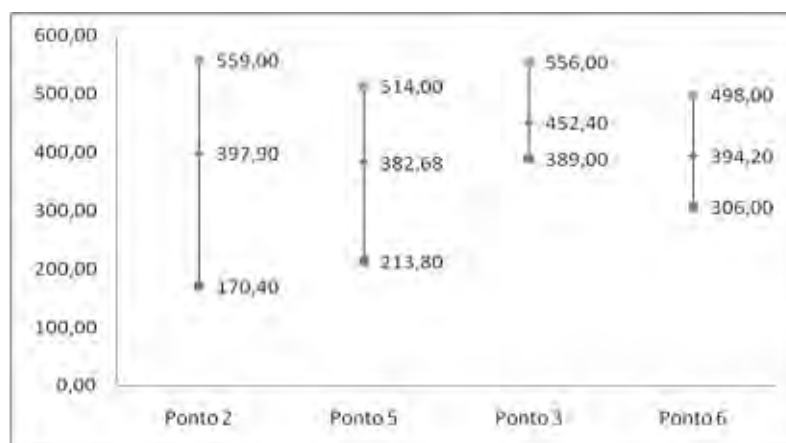


Figura 51 - Variação dos valores de condutividade ($\mu\text{S cm}^{-1}$).



Figura 52 - Variação temporal da condutividade no leito 1 de fluxo vertical.



Figura 53 - Variação temporal da condutividade no leito 2 de fluxo vertical.

5.6.7 *Sólidos Totais Dissolvidos (STD)*

Os valores médios e o desvio padrão dos STD nos pontos 02, 05, 03 e 06 podem ser observados na Tabela 13, já a variação deste parâmetro está representada na Figura 54.

As Figuras 55 e 56 apresentam a variação de STD durante o período da pesquisa nos leitos 1 e 2 de fluxo vertical.

Ao calcularmos a taxa de eficiência de remoção total encontramos o valor de 1,05% para o sistema inteiro, já para eficiência parcial no leito 1 o valor encontrado foi de 1,50% e no leito 2 de 17,91%.

Para este parâmetro também houve diferença significativa de redução entre os leitos 1 e 2.

Tabela 13 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para STD (mg L^{-1}).

Ponto de Coleta	Leito 1		Leito 2	
	Ponto 02	Ponto 05	Ponto 03	Ponto 06
Média	211,5	204	228,83	198,17
Desvio Padrão	84,91	70,69	37,24	41,05

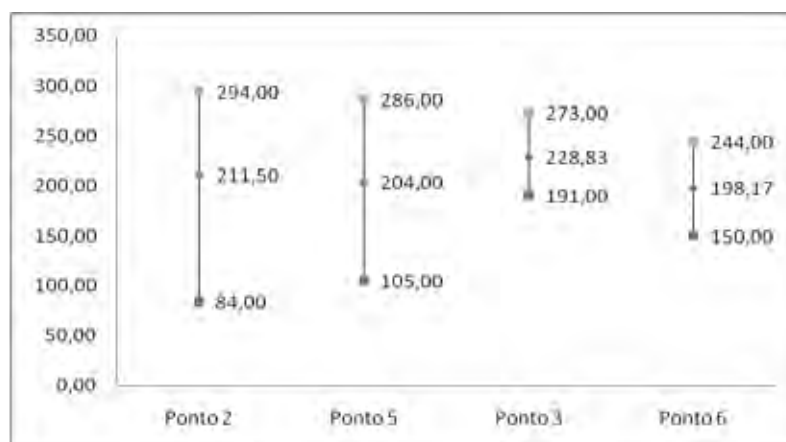


Figura 54 - Variação dos valores de STD (mg L^{-1}).

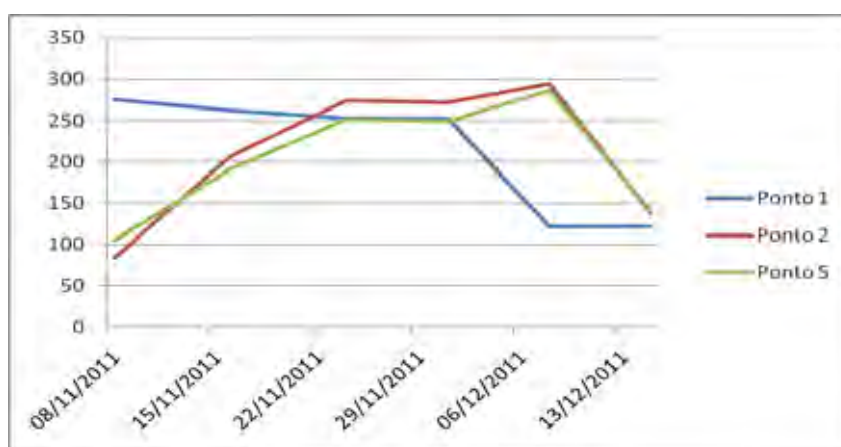


Figura 55 - Variação temporal de STD no leito 1 de fluxo vertical.



Figura 56 - Variação temporal de STD no leito 2 de fluxo vertical.

5.6.8 Cor

Os valores médios e desvio padrão encontrados para Cor estão dispostos na Tabela 14 e a variação deles ao longo do período da pesquisa estão representados na Figura 57.

As Figuras 58 e 59 apresentam a variação do oxigênio dissolvido durante o período da pesquisa nos leitos 1 e 2 de fluxo vertical.

Observando o gráfico abaixo é possível perceber que os valores da Cor aumentaram após passar pelos leitos de fluxo vertical. E a taxas de eficiência de remoção confirmam esse dado, pois na remoção do sistema geral o valor foi de 27,69%, já para os leitos de fluxo vertical os valores foram -21,43% e -102,23% para os leitos 1 e 2 respectivamente.

Aplicando o teste estatístico chegamos à conclusão de que há significância de diferença da remoção de Cor entre os leitos 1 e 2.

Tabela 14 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para (PtCo).

Ponto de Coleta	Leito 1		Leito 2	
	Ponto 02	Ponto 05	Ponto 03	Ponto 06
Média	23,33	28,33	37,66	76,16
Desvio Padrão	17,81	29,58	19,07	91,86

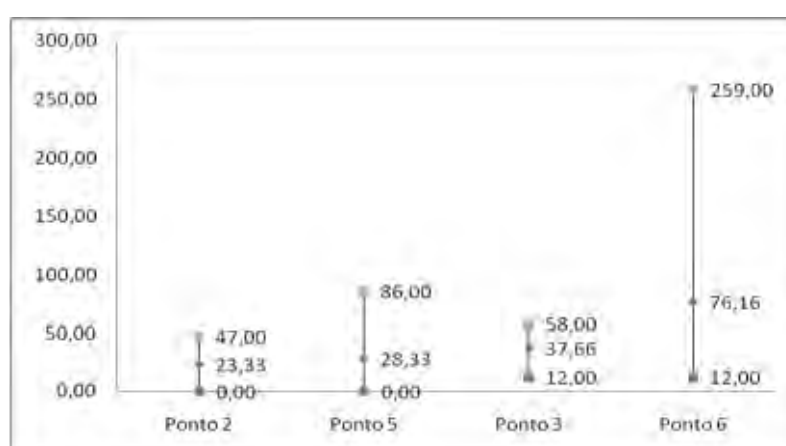


Figura 57 - Variação dos valores de Cor (PtCo) .

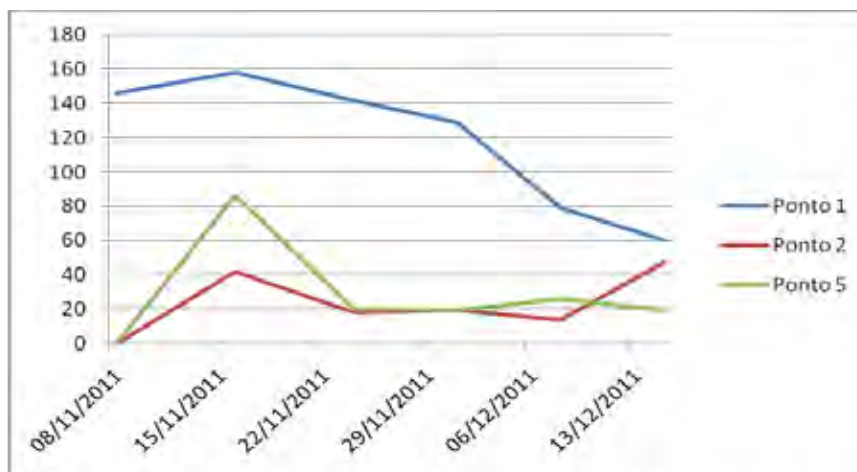


Figura 58 - Variação temporal de Cor no leito 1 de fluxo vertical.

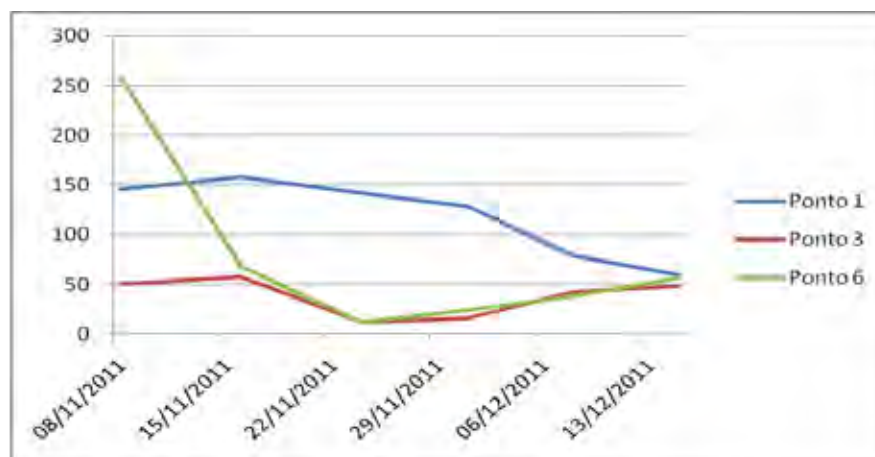


Figura 59 - Variação temporal de Cor no leito 2 de fluxo vertical.

5.6.9 Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)

Para o nitrogênio total Kjeldahl os valores médios e desvio padrão estão descritos na Tabela 15, enquanto a variação desse parâmetro ao longo do sistema pode ser visualizada na Figura 60.

As Figuras 61 e 62 apresentam a variação do NTK durante o período da pesquisa nos leitos 1 e 2 de fluxo vertical.

As eficiências de remoção do NTK ao longo do sistema foram de 88,29%, para o leito 1: -15,80% e para o leito 2: 46,63%.

Ao aplicarmos o teste estatístico (teste-t) podemos concluir que existe diferença significativa entre os leitos.

Tabela 15 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para (mg L^{-1}).

	Leito 1		Leito 2	
Ponto de Coleta	Ponto 02	Ponto 05	Ponto 03	Ponto 06
Média	6,33	7,33	13,83	7,33
Desvio Padrão	5,16	4,27	14,11	7,78

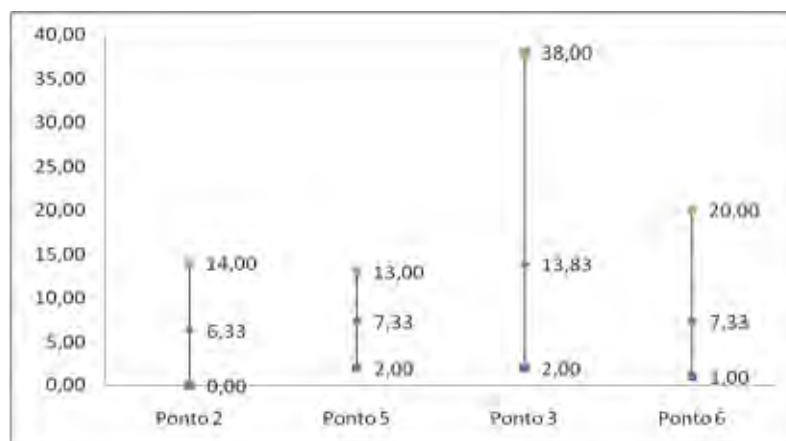
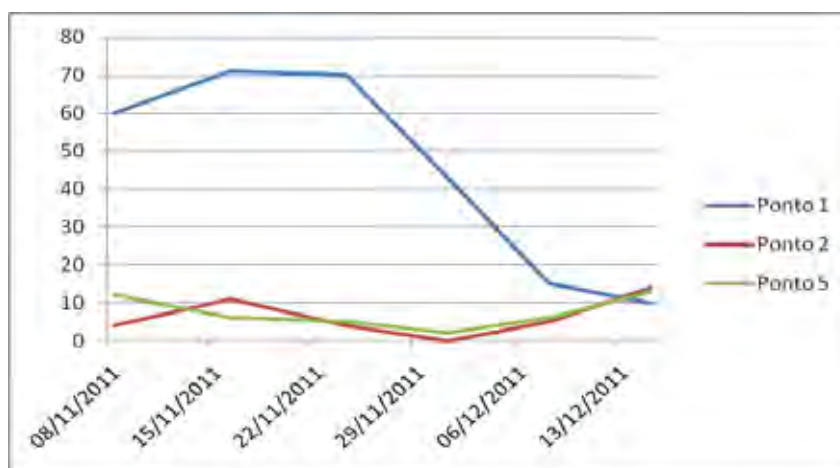
Figura 60 - Variação dos valores de NTK (mg L^{-1}) .

Figura 61 - Variação temporal do NTK no leito 1 de fluxo vertical.

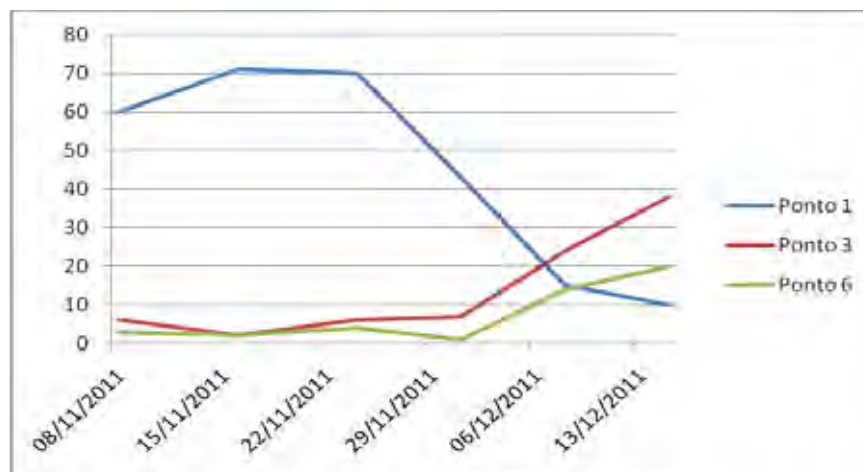


Figura 62 - Variação temporal do NTK no leito 2 de fluxo vertical.

5.6.10 Nitrogênio Amoniacal

Os valores médios e desvio padrão do nitrogênio amoniacal podem ser observados na Tabela 16, já a variação desses valores ao longo da pesquisa pode ser visualizada na Figura 63.

As Figuras 64 e 65 apresentam a variação do nitrogênio amoniacal durante o período da pesquisa nos leitos 1 e 2 de fluxo vertical.

Observando o gráfico abaixo é visível a queda expressiva do nitrogênio amoniacal em relação ao ponto de entrada e saída de ambos os leitos. Para a taxa de eficiência de remoção total foi encontrado o valor de 94,73% e para a eficiência parcial temos 81,12% para o leito 1 e 53,74% para o leito 2. Essa boa eficiência nos leitos de fluxo vertical já era esperada pois esse sistema é normalmente eficiente na nitrificação.

Para o nitrogênio amoniacal também há diferença significativa de remoção entre os dois leitos de fluxo vertical.

Tabela 16 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para Nitrogênio amoniacal (mg L^{-1}).

Ponto de Coleta	Leito 1		Leito 2	
	Ponto 02	Ponto 05	Ponto 03	Ponto 06
Média	4,45	0,84	4,67	2,16
Desvio Padrão	8,26	1,30	8,10	2,88

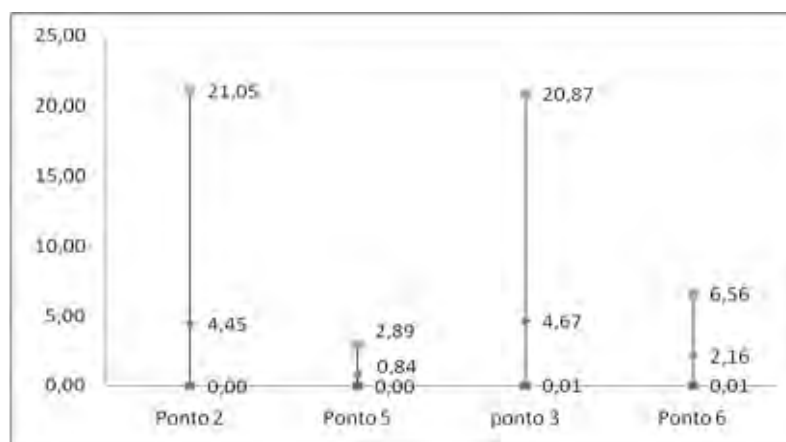


Figura 63 - Variação dos valores de Nitrogênio amoniacal (mg L^{-1}) .

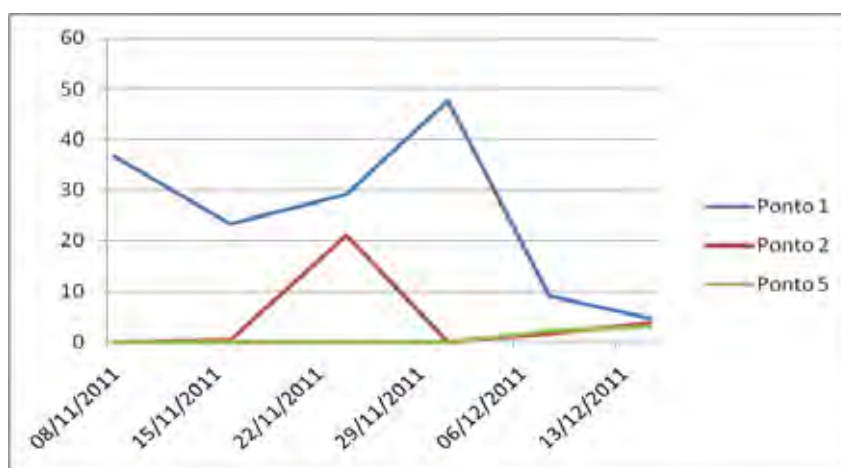


Figura 64 - Variação temporal do Nitrogênio amoniacal no leito 1 de fluxo vertical.

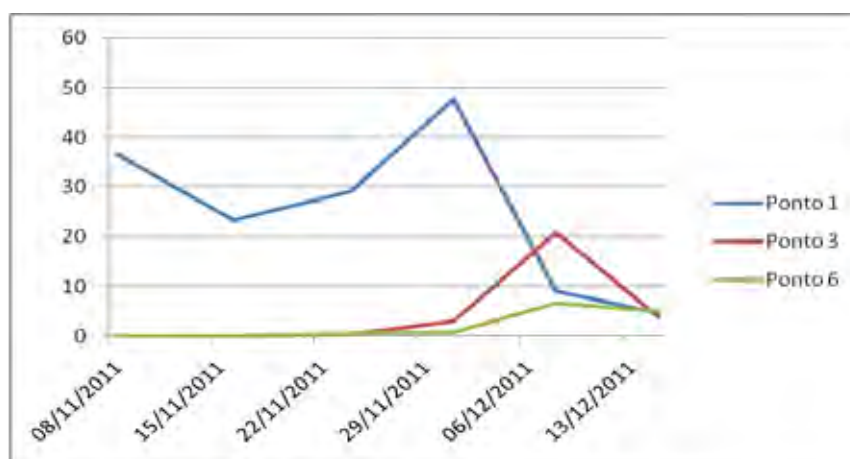


Figura 65 - Variação temporal do Nitrogênio amoniacal no leito 2 de fluxo vertical.

5.6.11 Nitrato

Os valores médios e o desvio padrão do nitrato nos pontos 02, 05, 03 e 06 podem se observados na Tabela 17, já a variação deste parâmetro está representada na Figura 66.

As Figuras 67 e 68 apresentam a variação do oxigênio dissolvido durante o período da pesquisa nos leitos 1 e 2 de fluxo vertical.

As eficiências calculadas foram de -32,16% para o sistema total, 56,65% para o leito 1 e 0,61% para o leito 2. Aplicando o teste estatístico chegamos à conclusão de que há significância de remoção do nitrato entre os leitos 1 e 2.

Tabela 17 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para Nitrato (mg L^{-1}).

Ponto de Coleta	Leito 1		Leito 2	
	Ponto 02	Ponto 05	Ponto 03	Ponto 06
Média	2,93	1,27	3,23	3,21
Desvio Padrão	1,64	1,02	4,06	3,15

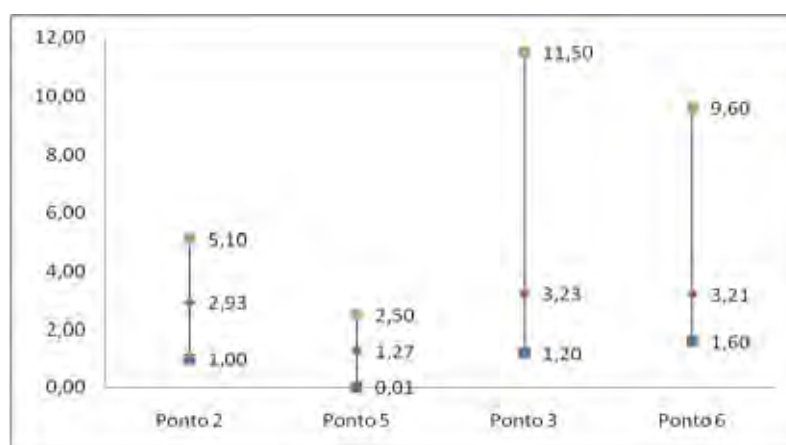


Figura 66 - Variação dos valores de Nitrato (mg L^{-1}).

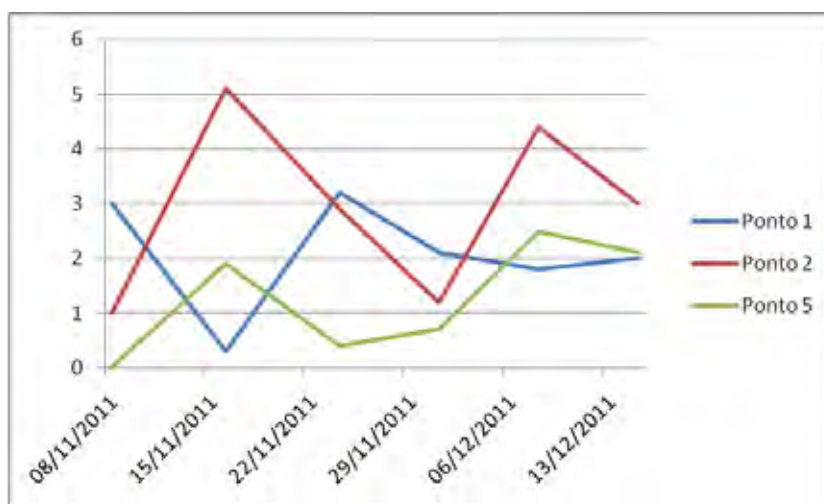


Figura 67 - Variação temporal do Nitrato no leito 1 de fluxo vertical.

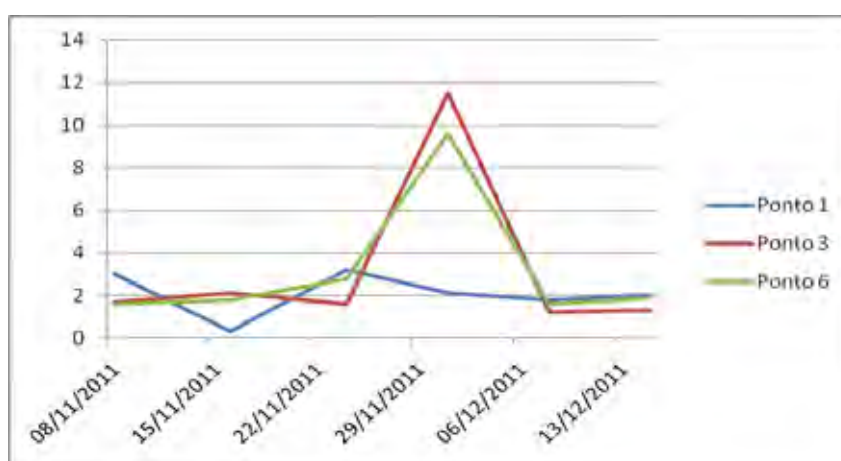


Figura 68 - Variação temporal do Nitrato no leito 2 de fluxo vertical.

5.6.12 Nitrito

Para o nitrito os valores médios e desvio padrão estão dispostos na Tabela 18 e a variação das concentrações ao longo do sistema na Figura 69.

As Figuras 70 e 71 apresentam a variação do nitrito durante o período da pesquisa nos leitos 1 e 2 de fluxo vertical.

A taxa de remoção de eficiência total encontrada foi de 10,43% e as taxas de eficiência parcial foram de 56,09% e -13,51% para os leitos 1 e 2 respectivamente.

Ao aplicarmos o teste estatístico (teste-t) podemos concluir que existe diferença significativa entre os leitos.

Tabela 18 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para Nitrito (mg L^{-1}).

Ponto de Coleta	Leito 1		Leito 2	
	Ponto 02	Ponto 05	Ponto 03	Ponto 06
Média	0,082	0,036	0,074	0,084
Desvio Padrão	0,13	0,05	0,09	0,08

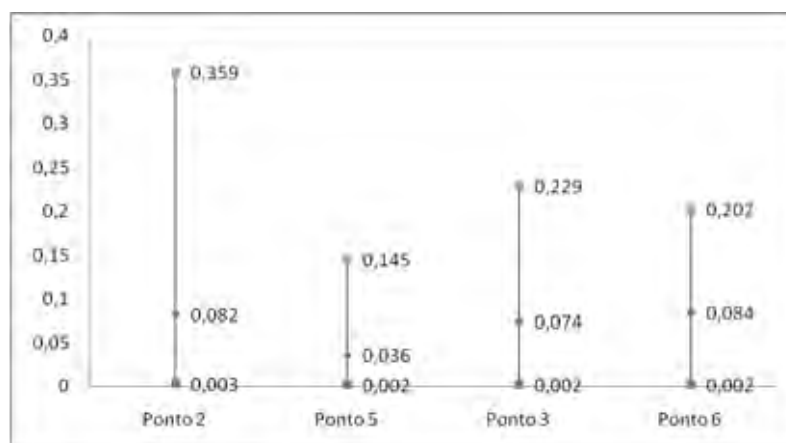
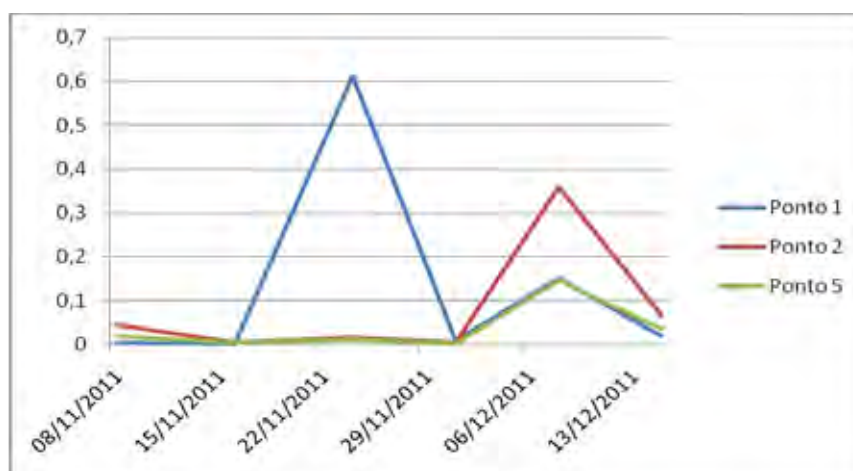
Figura 69 - Variação dos valores de Nitrito (mg L^{-1}) .

Figura 70 - Variação temporal do Nitrito no leito 1 de fluxo vertical.

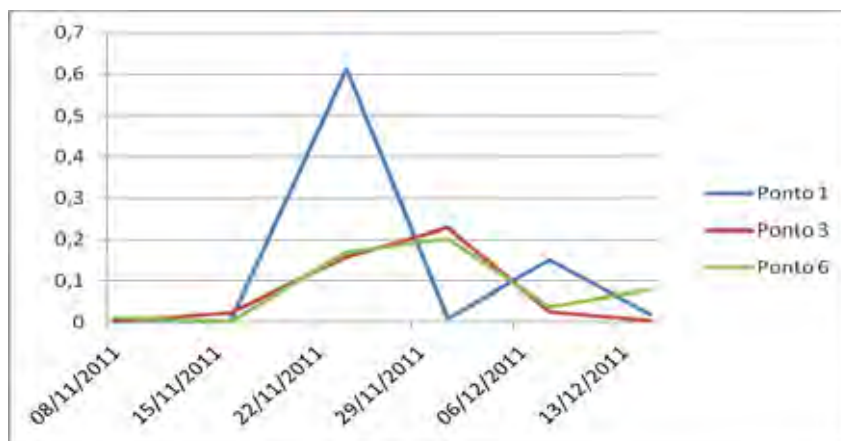


Figura 71 - Variação temporal do Nitrito no leito 2 de fluxo vertical.

5.6.13 *Fósforo Total*

Os valores médios e desvio padrão do fósforo total podem ser observados na Tabela 19, já a variação desses valores ao longo da pesquisa pode ser visualizada na Figura 72.

As Figuras 73 e 74 apresentam a variação do fósforo total durante o período da pesquisa nos leitos 1 e 2 de fluxo vertical.

Para a taxa de eficiência de remoção total foi encontrado o valor de - 4,97% e para a eficiência parcial temos 32,12% para o leito 1 e 42,62% para o leito 2.

Para o fósforo total também há diferença significativa de remoção entre os dois leitos de fluxo vertical.

Tabela 19 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para Fósforo Total (mg L^{-1}).

Ponto de Coleta	Leito 1		Leito 2	
	Ponto 02	Ponto 05	Ponto 03	Ponto 06
Média	3,02	2,05	2,44	1,40
Desvio Padrão	3,26	1,32	1,33	1,18

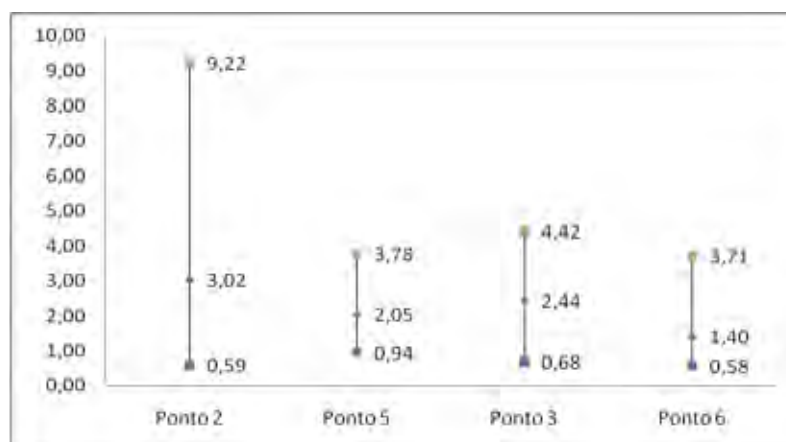


Figura 72 - Variação dos valores de Fósforo total (mg L^{-1}) .

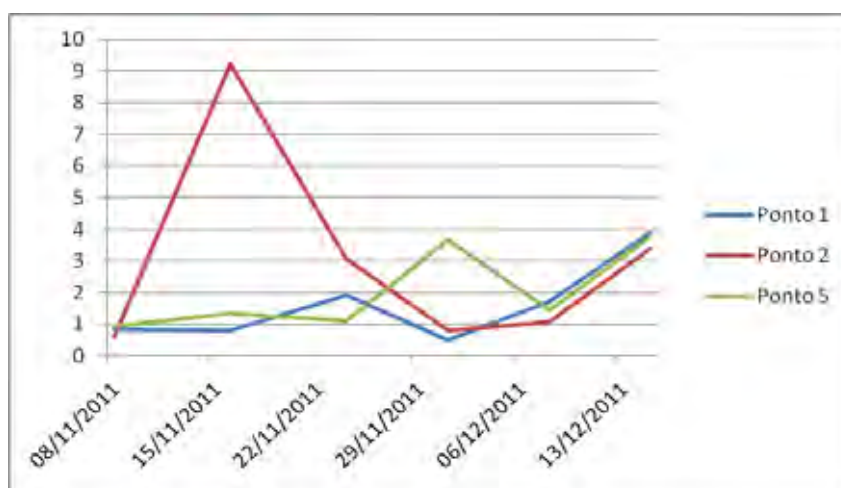


Figura 73 - Variação temporal do Fósforo total no leito 1 de fluxo vertical.

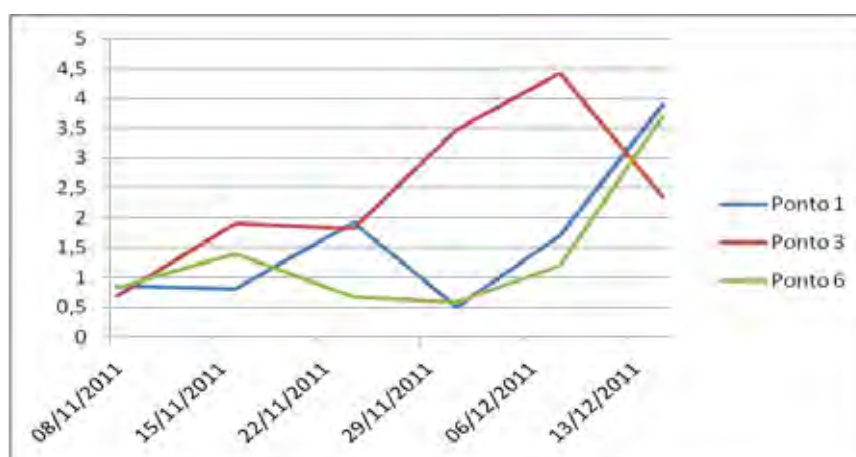


Figura 74 - Variação temporal do Fósforo total no leito 2 de fluxo vertical.

5.6.14 Fosfato

Os valores médios e desvio padrão do fosfato podem ser observados na Tabela 20, já a variação desses valores ao longo da pesquisa pode ser visualizada na Figura 75.

As Figuras 76 e 77 apresentam a variação do fosfato durante o período da pesquisa nos leitos 1 e 2 de fluxo vertical.

Para a taxa de eficiência de remoção total foi encontrado o valor de 44,41% e para a eficiência parcial temos 19,74% para o leito 1 e 25,65% para o leito 2.

Para o fósforo total também há diferença significativa de remoção entre os dois leitos de fluxo vertical.

Tabela 20 - Média e desvio padrão referentes aos valores encontrados para Fosfato (mg L^{-1}).

Ponto de Coleta	Leito 1		Leito 2	
	Ponto 02	Ponto 05	Ponto 03	Ponto 06
Média	5,47	4,39	5,73	4,26
Desvio Padrão	1,91	1,09	2,37	1,42

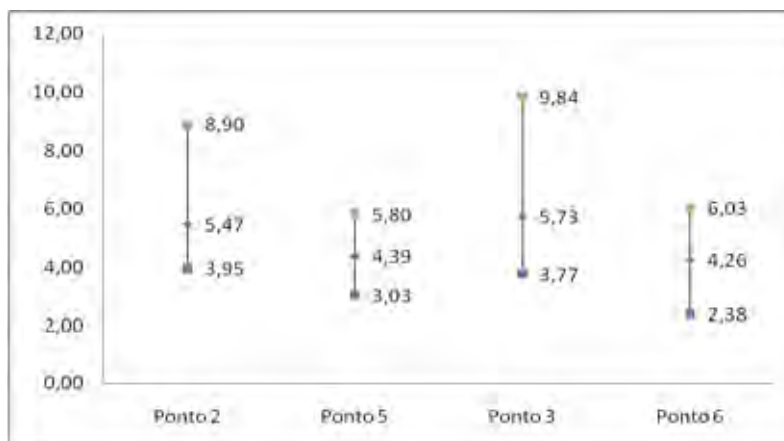


Figura 75 - Variação dos valores de Fosfato (mg L^{-1}) .

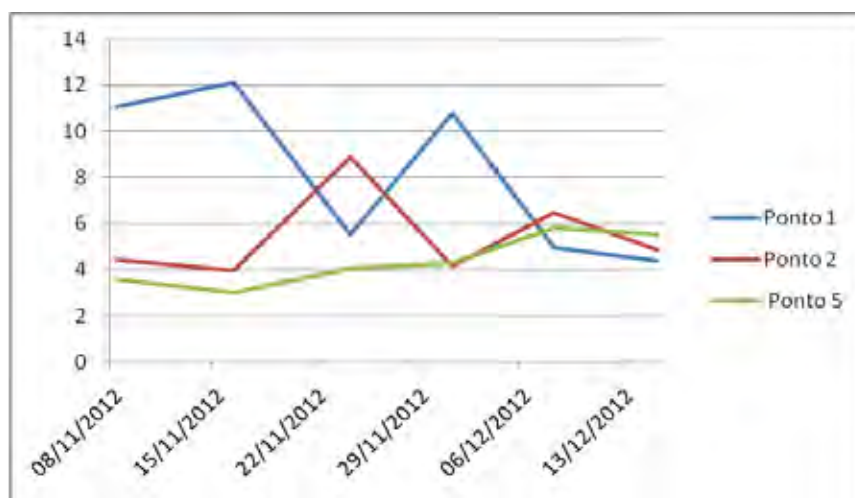


Figura 76 - Variação temporal do Fosfato no leito 1 de fluxo vertical.

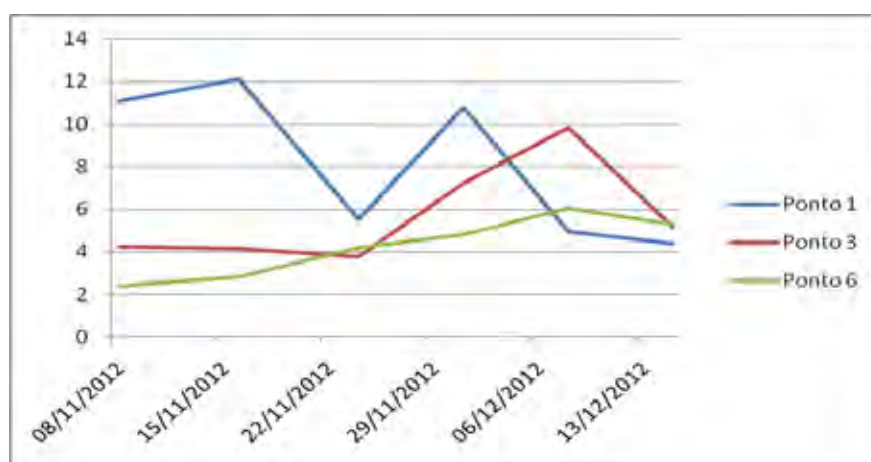


Figura 77 - Variação temporal do Fosfato no leito 2 de fluxo vertical.

5.6.15 *Coliformes Totais*

Na Figura 78 é possível observar as taxas de remoção logarítmica de coliformes totais para os leitos 1 e 2 de fluxo vertical.

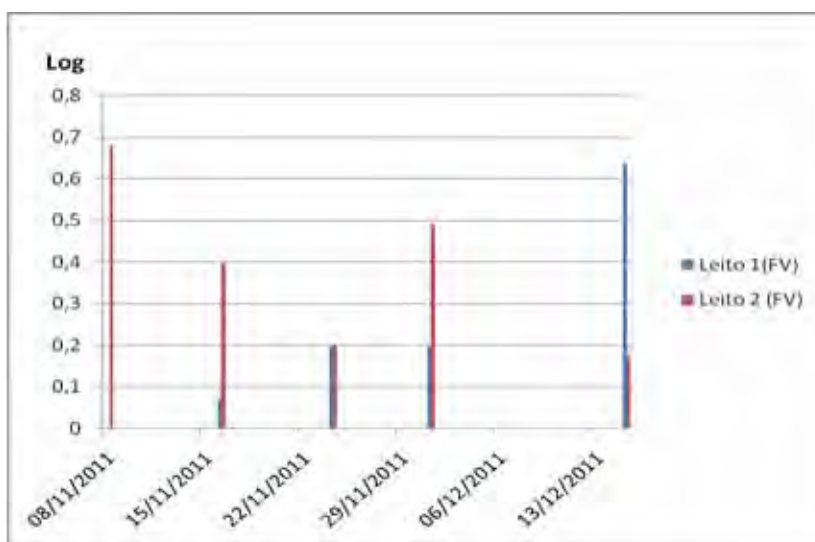


Figura 78 – Taxas de remoção de Coliformes Totais.

5.6.16 *Coliformes Fecais*

Na Figura 79 é possível observar as taxas de remoção logarítmica de coliformes fecais para os leitos 1 e 2 de fluxo vertical.

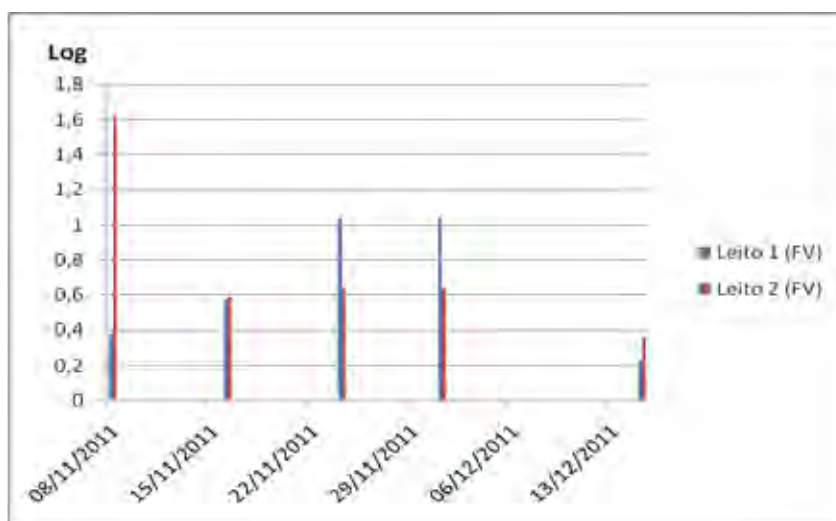


Figura 79 – Taxas de remoção de Coliformes Fecais.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Verificou-se que o sistema proposto pode ser facilmente aplicado, pois se trata de um projeto simples, que não necessita de técnicas arrojadas para sua implantação. No entanto, é importante ter especial atenção com algumas etapas, por exemplo:

- O terreno onde o sistema será instalado deve apresentar uma declividade natural que permita o escoamento gravitacional do líquido ao longo do sistema, terraplenagem excessiva pode elevar o custo do projeto chegando à inviabilizá-lo em alguns casos;
- A etapa da instalação da geomembrana necessita de cuidados especiais, pois deve ser realizada por pessoal capacitado para evitar a ocorrência de infiltrações e vazamentos;
- Cuidados especiais devem ser tomados com referência as cotas de níveis do entorno dos alagados, o que devem ser inferiores as bordas dos leitos, para que as águas pluviais não invadam os mesmos, evitando assim problemas de acréscimo da vazão no fluxo e introdução no leito de material em suspensão.

Com relação ao custo do projeto vale ressaltar que trata-se de uma pesquisa, portanto alguns itens que compõem o sistema fazem parte de testes que foram realizados e acabam por aumentar o custo do sistema. Alguns destes itens como: peneira estática; bombas; medidores de vazão, etc., podem ser substituídos por opções de menor valor.

Quanto à avaliação dos parâmetros físico-químicos e biológicos é importante ressaltar que o período desta pesquisa refere-se a etapa de maturação do sistema, portanto, não é possível afirmar que as taxas de eficiência de remoção total e parcial encontradas caracterizem o sistema, provavelmente essas taxas serão alteradas após a maturação do sistema. Lembrando que a ETE não recebeu a carga orgânica total esperada, pois a moradia estudantil ainda não estava em funcionamento no período da pesquisa.

O resultado de alguns parâmetros apresentou taxas de eficiência negativa, como no caso da Alcalinidade e Nitrato para o sistema total; Cor e NTK para o leito 1; DQO, Cor e Nitrito para o leito 2. Esses resultados podem ter sido influenciados pelo uso de desinfetantes e detergentes na lavagem dos pisos, banheiros e áreas anexas ao Departamento, assim como, a possível entrada de enxurrada nos leitos de fluxo vertical. Todos esses eventos estão sendo avaliados e deverão ser adequados ao sistema. Os dados meteorológicos demonstram que houve alguns picos de chuva no período estudado, essa alta quantidade pluviométrica em determinadas datas pode interferir nos resultados de alguns parâmetros.

Para a aplicação da ferramenta estatística (teste-t) houve diferença significativa para todos os parâmetros estudados entre os dois leitos. Essa constatação provavelmente aconteceu devido a diferença de composição dos substratos entre os leitos, lembrando que o leito 2 recebeu carga dobrada, por consequência da desativação do leito 3 no período estudado.

Atingindo a eficiência adequada, espera-se que o sistema proposto apresente como resultado final um efluente com significativa redução da matéria orgânica e nitrogênio amoniacal, e que possibilite a prática de reuso não potável, principalmente, na aplicação em sistemas de irrigação para a agricultura.

A realização deste projeto é uma ferramenta importante para o desenvolvimento do sistema de alagados construídos no Brasil, uma vez que, possibilita o conhecimento das técnicas de construção, manutenção e gastos para implantação de um sistema desse tipo. Com base nesse trabalho será possível elaborar cartilhas didáticas que orientem o público interessado a implantar o sistema.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the examination of Water and Wastewater**. 21 ed. Baltimore, 2005.

ARIAS C. A., BRIX H. AND GARZA M. F. **Alternative for phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands**. Book of the Conference of International Meeting on phytodepuration, p. 73-79. Lorca, Spain, 2005.

BASTIVIKEN S. **Nitrogen removal in treatment wetlands – Factors influencing spatial and temporal variations**. 2006. Linköping Studies in Science and Technology. Dissertation N° 1041. Linköping , 2006.

BRAGA, B; REBOUÇAS, A.C; TUNDISI, J.G. **Águas Doces do Brasil, capital ecológico, uso e conservação**. Ed.Nacional. São Paulo, 1999.

BRAGA, B.; HESPANHOL I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L de; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à engenharia ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 2ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 318p.

BRASIL (2005). Resolução **CONAMA 357/2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial de República Federativa do Brasil**. Brasília. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/>> Acesso em: 20 jul. 2011.

BRASIL (2008). Resolução **CONAMA 397/2008**. Altera o inciso II do § 4o e a Tabela X do § 5o, ambos do art. 34 da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA no 357, de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. **Diário Oficial de República Federativa do Brasil**. Brasília. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/>> Acesso em: 20 jul. 2011.

BRIX, H. **Wasterwater treatment in Constructed Wetlands: System Design, Removal Processes, and Treatment Performance**. In: MOSHIRI, G.A. (ed.) *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993.

BRIX, H., **Functions of macrophytes in constructed wetlands**. *Wat. Sci. Tech.* 29: 71-78, 1994.

BRIX, H.; SCHIERUP, H.H. **The use of aquatic macrophytes in water pollution control**. v.18, p.100. *Ambio*, 1989.

BRIX, H; ARIAS, C. A. **The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines.** *Ecological Engineering* 25. 491–500, 2005.

CAMPBELL, S. C; OGDEN, H. M. **Constructed Wetlands in the Sustainable Landscape.** United States of America. John Wiley & Sons, Inc, 1999.

CEPAGRI. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura. **Clima dos Municípios Paulistas.** Disponível em: < <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>> Acesso em: 28 nov. 2011.

CUNHA, C. A. G. **Análise da eficiência de um sistema combinados de alagados construídos na melhoria da qualidade das águas.** 174 p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2006.

DAVIS, L. **A handbook of constructed wetlands: A guide to creating wetlands for agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage, stormwater in the Mid-Atlantic Region.** ISBN: 0160529999, 1995.

EPA- United States Environmental Protection Agency. **Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters.** Manual. Cincinnati. 165p. Ohio, 2000

EPA- United States Environmental Protection Agency. **Constructed Treatment Wetlands.** EPA 843-F-03-013. Office of water, 2004.

ESTEVES, F. **Fundamentos de Limnologia.** Rio de Janeiro: Interciência. 602 p, 1998.

GALVÃO JUNIOR, A. C.; Paganini, W. S. **Aspectos conceituais da regulação de serviços de água e esgoto no Brasil.** Eng. Sanit. Ambient. v.14, n.1, p. 79-88, 2009.

GARCÍA – PÉREZ, A; HARRISON, M; GRANT, B. **Recirculating vertical flow constructed wetland: Green alternative to treating both human and animal sewage.** *Journal of environmental health*, 72(4). P 17-20, 2009.

GARCÍA – PÉREZ, A; HARRISON, M; GRANT, B. **Recirculating vertical flow constructed wetland for on-site sewage treatment: An approach for a sustainable ecosystem.** *Journal of water and environmental technology*, Vol. 9, No.1, 2011.

HOFFMANN, H; PLATZER, C; WINKER, M; MUENCH, V. E. **Technology review of constructed wetland - subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment.** Germany, 2011.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB (2008)**. Rio de Janeiro, 2010.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE cidades**. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=350600#>> Acesso em: 28 nov. 2011.

KADLEC, R. H; KNIGHT, R. L; VYMAZAL, L; BRIX, H; COOPER, P; HABERL, R. **Constructed wetlands for pollution control: process, performance, design and operation** – Scientific and Technical Report, London: IWA Publishing, n.8, 156p, 2000.

MARQUES, D. M. Terras úmidas construídas de fluxo subsuperficial. In: CAMPOS, J. R (Coord.) **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES. Cap. 15, p. 409-435, 1999.

OLIVEIRA, E. L; TALAMONI, J. L. B; ENOKIBARA, M; FILHO, G. S. C; NETO, L. C. **Alagados Construídos no tratamento de águas residuárias do Jardim Botânico Municipal de Bauru/SP**. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

^aOLIVEIRA, E. L. ; MALVA, M ; PEREIRA, RICARDO MOLTO ; CONCEIÇÃO, AUGUSTO DE ALMEIDA ; CASTILHO, G . **Constructed Wetland system for wastewater treatment by using recycled EPS (Expandable Polystyrene) Support Medium**. In: 10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, 2006, Lisboa. Wetland Systems for Water Pollution Control. Almada - Portugal : IWA - International Water Association and MAOTDR. v. II. p. 1215-1222, 2006.

^bOLIVEIRA, E. L. ; TALAMONI, JANDIRA L B ; ENOKIBARA, MARTA ; TRAFICANTE, C. **Constructed Wetlands for wastewater treatment in the Botanical Garden in the City of Bauru**. In: 10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, 2006, Lisboa. Wetland Systems for Water Pollution Control. Almada - Portugal : IWA- International Water Association and MAOTDR. v. II. p. 1093-1100, 2006.

OMS - ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **The world health report 2007: a safer future: global public health security in the 21st century**. Genebra, Suécia, 2007.

PEREIRA, H. R. **Uso do Vetiver na Estabilização de Taludes e Encostas**. Boletim Técnico. Ano 01, nº 003, 2006.

SARDINHA, D. S.; Conceição, F. T.; Souza, A. D. G.; Silveira, A.; Julio, M.; Gonçalves, J. C. S. I. **Avaliação da qualidade da água e autodepuração do Ribeirão do Meio, Leme (SP)**. Eng. sanit. ambient. V.13, Nº 3, p. 329-338, 2008.

SRIVASTAVA, J; KAYASTHA, S; JAMIL, S; SRIVASTAVA, V. **Environmental perspectives of *Vetiveria Zizanioides* (L.) Nash.** Acta Physiol Plant. P 413-417. Krakón, 2008.

THE RAMSAR CONVENTION ON WETLANDS. **Convenção de Ramsar.** Disponível em: http://www.ramsar.org/cda/en/ramsar-about-aboutramsar/main/ramsar/1-36%5E7687_4000_0__ Acesso em: 06 jul. 2011.

TROUONG, P.N.; HART, B. Vetiver system for wastewater treatment Technical Bulletin No. 2001/2. **Pacific Rim Vetiver Network.** Office of the Royal Development Projects Board, Bangkok, Thailand, 2001.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** Vol. 1, 3ª ed. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA: Editora UFMG. 443p. Belo Horizonte, 2005.

VYMAZAL, J; KRÖPFELOVÁ, L. **Wasterwater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow.** Environmental Pollution. Volume 14. Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Environmental Sciences. Czech republic: Springer Science. 561p, 2008.

X. Q. Tang; S. L. Huang & M. Scholz FCIWEM. **Comparison of phosphorus removal between vertical subsurface flow constructed wetlands with different substrates.** Water and Environment Journal 23. 180–188, 2009.

ZANELLA, L. **Plantas ornamentais no pós-tratamento de efluentes sanitários: Wetlands-Construídos utilizando brita e bambu como suporte.** Tese de Doutorado, UNICAMP. 189p. Campinas-SP, 2008.

Anexos

ANEXO 1 - 1ª Coleta Data: 08 de novembro de 2011. Horário: 08h30min.

Parâmetro	Unidade	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto4	Ponto5	Ponto6	Ponto7	Ponto8
Condutividade	µS/cm	561,0	170,4	389,0	286,4	213,8	340,0	-	350,0
pH		7,8	8,1	7,3	6,1	7,7	7,8	-	7,5
Alcalinidade	mg/L	169,6	169,6	84,8	97,5	169,6	63,6	-	190,8
OD	mg/L	1,0	2,9	3,6	2,7	3,7	4,3	-	6,9
DBO	mg/L	74	38	36	38	20	18		16
DQO	mg/L	133,0	2,0	4,0	4,0	NT	4,0	-	8,0
Sólidos totais dissolvidos	mg/L	275,0	84,0	191,0	140,0	105,0	167,0	-	172,0
Cor verdadeira	PtCo	146,0	(acima da faixa de leitura)	50,0	244,0	(acima da faixa de leitura)	256,0	-	299,0
NTK	mg/L	60,0	4,0	6,0	6,0	12,0	3,0	-	3,0
Nitrogênio amoniacal		36,7000	0,0104	0,0117	0,0900	0,0145	0,0131	-	0,0142
Nitrato	mg/L	3,0	1,0	1,7	1,4	0,0	1,6	-	0,8
Nitrato	mg/L	0,0050	0,0440	0,0020	0,0060	0,0190	0,0120	-	0,0090
Fosfato	mg/L	11,080	4,460	4,230	2,710	3,580	2,380	-	4,360
Fósforo total	mg/L	0,850	0,590	0,680	9,400	0,940	0,830	-	0,600
Coliformes totais	UFC/100 ml	1,23E+03	7,20E+02	2,50E+02	8,20E+02	7,20E+02	1,20E+03	-	1,80E+02
Coliformes fecais	UFC/100 ml	1,25E+03	1,60E+02	1,00E+01	1,60E+02	3,80E+02	4,20E+02	-	1,90E+02

ANEXO 2 - 2ª Coleta Data: 16 de novembro de 2011. **Horário:** 08h30min.

Parametro	Unidade	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto4	Ponto5	Ponto6	Ponto7	Ponto8
Condutividade	µS/cm	536	422	400	217,4	390	342	-	368
pH		7,47	7,83	7,7	6,75	7,92	7,63	-	7,86
Alcalinidade	mg/L de CaCo ₃	190,8	195,04	190,8	101,76	186,56	156,88	-	207,76
OD	mg/L	1,5	2,94	6	4,63	6,34	7,47	-	7,45
DBO	mg/L	-	4	2	4	5	4	-	-
DQO	mg/L	239	10	8	7	15	13	-	20
Solidos totais dissolvidos	mg/L	263	207	196	107	191	168	-	180
Cor verdadeira	PtCo	158	42	58	114	86	68	-	96
NTK	mg/L	71	11	2	2	6	2	-	3
Nitrogênio amoniacal		23,19	0,226151	0,019737	0,018997	0,001678	0,018421	-	0,002401
Nitrato	mg/L	0,3	5,1	2,1	1,8	1,9	1,8	-	1,4
Nitrito	mg/L	0,001	0,003	0,022	0,007	0,004	0,002	-	0,001
Fosfato	mg/L	12,12	3,95	4,16	2,59	3,03	2,84	-	3,08
Fósforo total	mg/L	0,8	9,22	1,9	0,74	1,35	1,34	-	1,22
Coliformes totais	UFC/100 ml	2,50E+02	4,00E+02	2,60E+02	3,60E+02	4,70E+02	6,50E+02	-	9,40E+02
Coliformes fecais	UFC/100 ml	1,70E+02	1,60E+02	7,00E+01	2,10E+02	6,00E+02	2,70E+02	-	9,20E+02

ANEXO 3 - 3ª Coleta Data: 24 de novembro de 2011. **Horário:** 09h00min.

Parametro	Unidade	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto4	Ponto5	Ponto6	Ponto7	Ponto8
Condutividade	µS/cm	515	559	556	493	514	485	-	488
pH		8,16	7,84	7,2	6,85	7,93	7,19	-	7,44
Alcalinidade	mg/L de CaCo3	190,8	220,48	195,04	169,6	199,2	178,08	-	169,6
OD	mg/L	0,6	2,3	3,2	2,16	1,87	3,73	-	6,22
DBO	mg/L	86	12	9	10	9	7	-	3
DQO	mg/L	211	116	98	112	101	90	-	91
Solidos totais dissolvidos	mg/L	253	274	273	241	252	237	-	239
Cor verdadeira	PtCo	142	18	12	2	20	12	-	20
NTK	mg/L	70	4	6	8	5	4	-	3
Nitrogênio amoniacal		29,6	21,05	0,245	2,06	0,029	0,44	-	0,45
Nitrato	mg/L	3,2	2,9	1,6	2	0,4	2,8	-	3,1
Nitrito	mg/L	0,013	0,015	0,159	0,002	0,01	0,169	-	0,13
Fosfato	mg/L	5,51	8,9	3,77	6,06	4,06	4,21	-	4,97
Fósforo total	mg/L	1,92	3,06	1,82	1,73	1,09	0,67	-	0,71
Coliformes totais	UFC/100 ml	8,00E+02	5,20E+02	3,10E+02	8,10E+02	8,20E+02	4,90E+02	-	2,40E+02
Coliformes fecais	UFC/100 ml	6,30E+02	1,10E+02	3,00E+01	5,50E+02	1,00E+02	1,30E+02	-	1,40E+02

ANEXO 4 - 4ª Coleta Data: 01 de dezembro de 2011. **Horário:** 09h30min.

Parametro	Unidade	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto4	Ponto5	Ponto6	Ponto7	Ponto8
Condutividade	µS/cm	517	556	504	471	508	498	-	498
pH		7,66	7,46	6,65	6,62	7,57	6,58	-	6,94
Alcalinidade	mg/L de CaCo3	195,04	237,44	186,56	190,8	233,2	169,6	-	178,08
OD	mg/L	0,5	1,81	1,89	1,96	2,0	2,2	-	4,0
DBO	mg/L	-	-	58	84	-	-	-	46
DQO	mg/L	308	33	3	22	26	10	-	18
Solidos totais dissolvidos	mg/L	253	272	249	231	249	244	-	244
Cor verdadeira	PtCo	129	19	16	6,0	19	24	-	18
NTK	mg/L	43	0,0	7,0	4,0	2,0	1,0	-	2,0
Nitrogênio amoniacal		47,66	0,0	3,04	4,56	0,0	0,841	-	0,674
Nitrato	mg/L	2,1	1,2	11,5	1,9	0,7	9,6	-	8,7
Nitrito	mg/L	0,009	0,004	0,229	0,007	0,002	0,202	-	0,188
Fosfato	mg/L	10,77	4,13	7,22	2,77	4,31	4,8	-	4,68
Fósforo total	mg/L	0,5	0,8	3,48	2,63	3,68	0,58	-	0,82
Coliformes totais	UFC/100ml	8,00E+02	5,20E+02	3,10E+02	8,10E+02	8,20E+02	1,00E+02	-	8,00E+01
Coliformes fecais	UFC/100ml	6,20E+02	1,10E+02	3,00E+01	5,50E+02	1,00E+01	1,30E02	-	1,40E+02

ANEXO 5 - 5ª Coleta Data: 08 de dezembro de 2011. **Horário:** 09h00min.

Parametro	Unidade	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8
Condutividade	µS/cm	246	601	538	376	583	454	-	498
pH		6,99	6,72	6,15	6,23	6,65	6,19	-	6,61
Alcalinidade	mg/L de CaCo3	106	203,52	199,28	89,04	2,92	2,65	-	4,83
OD	mg/L	3,2	2,66	1,78	2,75	2,92	2,65	-	4,83
DBO	mg/L	2,0	3,0	2,0	15	3,0	10	-	6,0
DQO	mg/L	20	13	16	17	13	77	-	15
Solidos totais dissolvidos	mg/L	121	294	264	184	286	223	-	244
Cor verdadeira	PtCo	79	14	42	12	26	38	-	74
NTK	mg/L	15	5,0	24	16	6,0	14	-	11
Nitrogênio amoniacal		9,14	1,54	20,87	14,56	2,08	6,56	-	2,52
Nitrato	mg/L	1,8	4,4	1,2	1,4	2,5	1,6	-	1,9
Nitrito	mg/L	0,15	0,359	0,026	0,028	0,145	0,037	-	0,191
Fosfato	mg/L	4,98	6,49	9,84	2,74	5,8	6,03	-	6,11
Fósforo total	mg/L	1,7	1,07	4,42	4,33	1,44	1,2	-	3,43
Coliformes totais	UFC/100ml	-	-	-	-	-	-	-	-
Coliformes fecais	UFC/100ml	-	-	-	-	-	-	-	-

ANEXO 6 - 6ª Coleta Data: 15 de dezembro de 2011. **Horário:** 09h00min.

Parametro	Unidade	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto4	Ponto5	Ponto6	Ponto7	Ponto8
Condutividade	μS/cm	248,4	282,1	408	458	287,6	306	-	311
pH		7,15	7,58	6,99	6,6	7,2	6,87	-	7,0
Alcalinidade	mg/L de CaCo3	84,8	106	161,12	135,68	122,96	131,44	-	122,96
OD	mg/L	6,78	3,8	2,24	2,75	3,63	3,27	-	4,11
DBO	mg/L	15,3	8,0	37,9	18,8	25	23	-	21
DQO	mg/L	67	31	16	35	20	29	-	33
Solidos totais dissolvidos	mg/L	122	138	200	225	141	130	-	152
Cor verdadeira	PtCo	60	47	48	29	19	56	-	52
NTK	mg/L	10	14	38	37	13	20	-	14
Nitrogênio amoniacal		4,61	3,8	3,86	10,86	2,89	5,07	-	4,28
Nitrato	mg/L	2,0	3,0	1,3	5,5	2,1	1,9	-	2,1
Nitrito	mg/L	0,019	0,065	0,005	0,247	0,034	0,08	-	0,104
Fosfato	mg/L	4,41	4,87	5,14	3,65	5,54	5,29	-	3,98
Fósforo total	mg/L	3,91	3,39	2,34	3,74	3,78	3,71	-	3,37
Coliformes totais	UFC/100ml	6,70E+02	1,90E+02	4,50E+02	2,80E+02	8,20E+02	3,00E+02	-	9,50E+02
Coliformes fecais	UFC/100ml	4,70E+02	3,40E+02	2,50E+02	3,00E+02	2,00E+02	5,80E+02	-	8,50E+02