

## **DESEMPENHO DE UM *WETLAND* CONSTRUÍDO HORIZONTAL EMPREGADO NO TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO AO LONGO DE 20 ANOS DE OPERAÇÃO**

Benny Zuse Rousso

Orientadora: Doutoranda Catiane Pelissari

2014/2



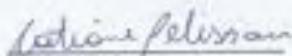
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL

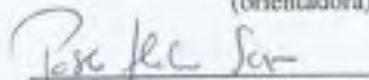
DESEMPENHO DE UM WETLAND CONSTRUÍDO HORIZONTAL  
EMPREGADO NO TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO AO  
LONGO DE 20 ANOS DE OPERAÇÃO

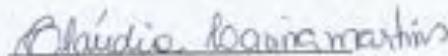
BENNY ZUSE ROUSSO

Trabalho submetido à banca examinadora como parte  
dos requisitos para Conclusão do Curso em Graduação  
em Engenharia Sanitária e Ambiental – TCC II.

BANCA EXAMINADORA:

  
Doutoranda Catiane Pelissari  
(orientadora)

  
Prof. Dr. Pablo Heleno Sezerino  
(membro da Banca Examinadora)

  
Dra Claudia Lavina Martins  
(membro da Banca Examinadora)

FLORIANÓPOLIS, (SC)  
NOVEMBRO/2014



*Dedico este trabalho a meus pais,  
que sempre me proveram o  
substrato último para perdurar  
nessa jornada: o amor  
incondicional.*



## AGRADECIMENTOS

Um ciclo se fecha. E como foi bom esse ciclo;

Agradeço primeiramente à minha família, em ordem alfabética para ser imparcial, como todo bom engenheiro deve ser: Ana Lucia, Benjamin e Claire; vocês são o meu maior tesouro!, sem vocês eu não teria visto o horizontes que vi e que verei, e nem mesmo os teria visto como eu os vi;

Agradeço em seguida Catiane Pelissari, que se tornou mais que minha orientadora, mas uma amiga. Obrigado pela força, suporte e risadas durante o desenvolvimento deste trabalho. Eles foram imprescindíveis para sua concretização;

Agradeço também ao Prof. Pablo Sezerino, por me receber de braços abertos e me designar confiança em atividades desenvolvidas pelo GESAD;

Aos amigos ENS08.1, vocês foram marcantes na minha jornada acadêmica. As brincadeiras durante a faculdade certamente fizeram desta etapa da minha vida muito mais do que uma capacitação técnica;

A todos que de alguma forma cruzaram meu caminho e que me inspiraram; existem momentos que não lembramos mas que definitivamente nos direcionam a bons rumos. Minha eterna gratidão por contribuírem, mesmo sem se darem conta, à minha formação pessoal;

E finalmente, reconheço que alguns dos caminhos tortos que trilhei hoje fazem sentido; obstáculos que enfrentei, fortaleceram-me; e algumas tristezas, ensinaram-me. Por isso, seria incoerente não ser grato, também, a este operar, este incompreensível, chamado por alguns de Deus.

Agora, um novo ciclo se abre. E que ele seja tão bom quanto.



*Afortunado é aquele que viu o mundo, e sabe que ainda nada viu.*

## RESUMO

A tecnologia de *wetlands* construídos é uma alternativa para tratamento de águas residuárias com baixo custo de implantação e manutenção, operação simplificada e depuração refinada de efluentes diversos. A compreensão e aferição de seus fundamentos e resultados é um dos norteadores de sua aplicação prática. Ainda que sua aplicação e aprofundamento acadêmico em termos mundiais cresçam, a tecnologia apresenta poucos estudos relativos à vida útil de operação e seu respectivo desempenho ao longo desta, por períodos extensos. Este trabalho objetiva a compilação e análise de dados de desempenho de um *wetland* construído horizontal, situado no município de Agronômica, Santa Catarina, e que vêm tratando esgotos domésticos ao longo de 20 anos de operação. Por meio de revisão bibliográfica e atividades laboratoriais e de campo, pôde-se verificar a efetividade do sistema em estudo ao longo de sua operação. Apesar de situações adversas como o carreamento de argila sobre sua área de operação, ocorrido no início de 2014, o sistema apresentou resiliência fornecendo remoções de matéria orgânica superiores a 85% e remoções de nutrientes na ordem de 80-98% obedecendo critérios estabelecidos em normativas de escala Federal e Estadual.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tratamento de Esgoto doméstico, *Wetlands* Construídos Horizontais, Tempo de Operação.

## **ABSTRACT**

Constructed wetlands technology is a wastewater treatment option with low implementation and maintenance costs, besides simplified operation. It's a technology that shows good treatment efficiencies for various wastewater sources. The deep understanding of its behaviour and the record of its results are two cornerstones for its growth and further practical employment. Even though the energy disposed on studies over this technology grows daily around the globe, its notable the lack of studies that investigate its lifespan and efficiency during its operation for long periods. This paper aims to compile and analyse the overall efficiency of a constructed wetland with horizontal sub-surface flow that has been receiving domestic effluents for the last 20 years. The system is set in the town of Agronômica, countryside of Santa Catarina's state, Brazil. Through literature review, field campaign and laboratory analysis, it was verified the system's performance during its whole operation. Despite adverse conditions like clay loading over the system, it has presented resilience displaying organic removal rates superior than 85% and nutrient removal rates between 80 and 98% and adequacy to National and State legislation.

**KEYWORDS:** Domestic wastewater treatment, Horizontal Sub-surface Flow Constructed Wetlands, Lifespan of Constructed Wetlands.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>14</b>
<b>2. OBJETIVOS E FINALIDADE</b> .....	<b>16</b>
2.1. OBJETIVO GERAL .....	16
2.2. FINALIDADE .....	16
2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>17</b>
3.1. WETLANDS CONSTRUÍDOS (WC) .....	17
3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS WC .....	18
<b>3.2.1. <i>Wetland</i> Construído Horizontal (WCH)</b> .....	<b>20</b>
3.3. ELEMENTOS ATUANTES .....	21
<b>3.3.1. Macrófitas</b> .....	<b>21</b>
<b>3.3.2. Material Filtrante</b> .....	<b>22</b>
<b>3.3.3. Micro-organismos</b> .....	<b>24</b>
3.4. TRANSFORMAÇÃO E REMOÇÃO DE POLUENTES EM WCH .....	25
3.5. DESEMPENHO DE WCH .....	26
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
4.1. DESCRIÇÃO DO LOCAL EM ESTUDO .....	29
4.2. SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM ESTUDO	30
<b>4.2.1. Dimensionamento do sistema</b> .....	<b>30</b>
<b>4.2.2. Aspectos construtivos e disposição do sistema</b> .....	<b>32</b>
4.3. LEVANTAMENTO DE DADOS .....	34
<b>4.3.1. Dados de Qualidade do Efluente</b> .....	<b>34</b>
<b>4.3.2. Dados de Vazão da terceira campanha</b> .....	<b>34</b>
4.4. ESTIMATIVA DE VAZÃO DURANTE A TERCEIRA CAMPANHA .....	35
4.5. ANÁLISES LABORATORIAIS .....	35
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>37</b>
5.1. VAZÕES APLICADAS AO SISTEMA DURANTE A TERCEIRA CAMPANHA .....	37
5.1. DESEMPENHO DO SISTEMA .....	39
<b>5.1.1. Primeira campanha</b> .....	<b>39</b>
<b>5.1.2. Segunda campanha</b> .....	<b>40</b>
<b>5.1.3. Terceira campanha</b> .....	<b>42</b>

5.1.3.1. Carga Aplicada .....	45
<b>5.1.4. Evolução de desempenho do sistema ao longo de 20 anos .....</b>	<b>48</b>
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>53</b>
<b>7. REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>55</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>60</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Classificação dos <i>wetlands</i> construídos.....	19
<b>Figura 2</b> – Esquema de um <i>Wetland</i> Construído Horizontal.....	20
<b>Figura 3</b> - Disposição das camadas aeróbias e anaeróbias no biofilme.....	24
<b>Figura 4</b> – Localização do CETRAG no município de Agronômica ...	29
<b>Figura 5</b> - Centro de Treinamento de Agronômica, CETRAG.....	30
<b>Figura 6</b> – Macrófita empregada no WCH em estudo.....	32
<b>Figura 7</b> - Tanque séptico enterrado.....	32
<b>Figura 8</b> – Pontos de coleta do sistema em estudo.....	33
<b>Figura 9</b> - Esquema do WCH do CETRAG.....	33
<b>Figura 10</b> - Variação de contribuição de vazão ao longo do período de fevereiro a novembro/2014.....	38
<b>Figura 11</b> - Afluente (à esquerda) e efluente (à direita) do WCH de Agronômica.....	43
<b>Figura 12</b> – Estado atual do sistema.....	43
<b>Figura 13</b> – Modificação da superfície do WCH.....	44
<b>Figura 14</b> - Distribuição das vazões estimadas durante o período de fevereiro a outubro de 2014. Realizado utilizando o <i>software</i> STATISTICA 7.0.....	46
<b>Figura 15</b> - Remoção de DQO ao longo da vida operacional de três WCH.....	50
<b>Figura 16</b> - Remoção de SS ao longo da vida operacional de três WCH.....	50
<b>Figura 17</b> - Remoção de $N-NH_4^+$ ao longo da vida operacional de três WCH.....	51
<b>Figura 18</b> - Remoção de $N-NO_3^-$ ao longo da vida operacional de três WCH.....	52
<b>Figura 19</b> - Remoção de $PT^-$ ao longo da vida operacional de três WCH.....	52

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Transformação e remoção de poluentes em WCH. ....	25
<b>Tabela 2</b> - Dados de desempenho de WCH utilizados para o tratamento de águas residuárias domésticas. ....	27
<b>Tabela 3</b> - Coeficientes de consumo de água por atividade comercial. O valor apresentado indica o intervalo identificado pelos autores e o valor entre parênteses como o valor indicado.....	35
<b>Tabela 4</b> - Metodologia adotada para cada um dos parâmetros analisados.....	36
<b>Tabela 5</b> - Faixas de leituras por parâmetro analisado.....	36
<b>Tabela 6</b> – Resultados médios e desvio padrão (DP) referente os resultados físico-químico e biológico obtidos durante a campanha de 1994-1995. ....	39
<b>Tabela 7</b> – Resultados médios e desvio padrão (DP) referente aos resultados físico-químico e biológico obtidos durante a campanha de 2005-2006 .....	41
<b>Tabela 8</b> - Caracterização físico-química obtida durante a campanha de 2014. ....	42
<b>Tabela 9</b> - Carga aplicada ao WCH de Agronômica em 2014.....	46
<b>Tabela 10</b> - Comparativo entre o sistema em estudo e outros WCH. ...	47
<b>Tabela 11</b> – Evolução do desempenho do WCH de Agronômica. ....	48
<b>Tabela 12</b> - Dados físico-químicos relativos ao mês de setembro/2014. ....	60
<b>Tabela 13</b> - Dados físico-químicos relativos ao mês de outubro/2014. ....	60
<b>Tabela 14</b> - Dados físico-químicos relativos ao mês de novembro/2014. ....	61

## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Segundo o 18º diagnóstico realizado pelo Sistema Nacional de Informações de Saneamento – SNIS (2012), somente 48,3% dos municípios brasileiros possuem sistema de esgotamento sanitário, sendo que, 69,4% desses, ou aproximadamente 38% do total de municípios brasileiros, incluem tratamento de esgotos ao sistema de esgotamento (SNIS, 2012). No estado de Santa Catarina, este percentual é consideravelmente menor, abrangendo somente 9% da população (PHILIPPI *et al.*, 2006).

É notório observar que as estatísticas se referem somente à existência do serviço de esgotamento sanitário centralizado no município, que abrange coleta, transporte, tratamento e lançamento. Os dados não refletem características de extensão da rede e qualidade de atendimento, o que implica em dizer que a situação de saneamento brasileira é ainda pior do que o apresentado pelas estatísticas (SNIS, 2012).

A ausência de sistemas de esgotamento sanitário centralizado se dá, muitas vezes, devido à inviabilidade econômica em lugares com baixa densidade demográfica, como é o caso de ambientes rurais, periféricos ou isolados. Contudo, tendo em vista que a universalização do saneamento de qualidade, estabelecida pela lei 11.445/2007, a Política Nacional de Saneamento, é definida como princípio da política e direito de todo cidadão e, conforme firmado, por parte do Governo Brasileiro junto as Organizações das Nações Unidas (ONU) nas chamadas Meta do Milênio, em 2000, o compromisso de reduzir pela metade, até 2015, a proporção de população sem acesso permanente a água potável e esgotamento sanitário.

Diante deste contexto, faz-se necessária a busca de alternativas para fornecer meios viáveis para que todos os brasileiros tenham acesso a saneamento de qualidade. Dessa forma, os sistemas descentralizados de tratamento de efluente surgem como alternativa para melhoria deste cenário.

Andreoli *et al* (2009) afirmam que 23% da população brasileira se utiliza somente de tanque séptico como solução para tratamento de esgotos gerados em locais desprovidos de sistemas centralizados. Contudo, como esta tecnologia se direciona primordialmente ao tratamento primário de esgotos, ela não apresenta efetividade na remoção de matéria orgânica solúvel, nutrientes e patógenos. Assim, a adoção única de tanque séptico como tratamento de efluentes acaba por

gerar um risco inerente de poluição ambiental e disseminação de doenças de veiculação hídrica.

A complementação do tanque séptico é uma opção viável para tanto sistemas já existentes quanto para futuros sistemas a serem implantados. Dentre as inúmeras possibilidades de tecnologias existentes para suprir essa lacuna, destaca-se os sistemas naturais de tratamento de esgoto como os *wetlands* construídos (WC) que são tecnologias que simulam e replicam de forma otimizada ambientes naturais, onde ocorrem o amortecimento e absorção de cargas orgânicas na natureza. Esses sistemas permitem a obtenção de efluentes com parâmetros de qualidade superiores quando comparados a tratamentos primários, em termos de matéria orgânica carbonácea, sólidos em suspensão, frações nitrogenadas e patógenos. Além disso, apresentam baixo custo de implantação e manutenção, e, também, operação simplificada. (SEZERINO, 2006),

O entendimento profundo do comportamento desses sistemas é um dos pilares para a otimização de seu funcionamento e a adoção da tecnologia por parte da sociedade. O conhecimento acadêmico e prático, tanto em escala piloto quanto real de WCs, vem sendo consideravelmente difundido em diversos países.

Dentre os vários fatores intrínsecos a compreensão dos fenômenos associados a *wetlands*, a identificação de seu comportamento ao longo dos anos, ou vida útil, é de elevada importância. Todavia, são escassas na literatura exemplificações de sistemas monitorados com longevidade maior do que 5 anos. Levando-se em consideração que o sistema é aberto e natural, a escassez de dados mensurados de longa data atua como forte limitante na previsibilidade de atuação de tais sistemas.

O presente trabalho consiste na avaliação do desempenho de um *Wetland* Construído Horizontal em operação há 20 anos, situado no CETRAG - Centro de Treinamento de Agrônômica, pertencente a EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, município de Agrônômica, Santa Catarina.

## **2. OBJETIVOS E FINALIDADE**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Avaliar o desempenho de um *Wetland* Construído Horizontal (WCH) aplicado ao tratamento de esgoto doméstico ao longo de 20 anos de operação.

### **2.2. FINALIDADE**

Este trabalho tem por finalidade verificar a influência do tempo de operação na eficiência de tratamento de um WCH e fornecer subsídio para estudos de tratamento de esgoto descentralizado sobre a temática de vida útil de WCH.

### **2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Resgatar e compilar informações de dimensionamento, operação e eficiência de remoção durante sua operação;
- Analisar a eficiência de remoção de matéria orgânica carbonácea, nitrogênio amoniacal, sólidos suspensos e fósforo;
- Comparar a eficiência de tratamento do sistema nos momentos de 1, 10 e 20 anos de operação.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. WETLANDS CONSTRUÍDOS (WC)

Os *Wetlands* Construídos (WC), são sistemas que se baseiam nos princípios dos processos naturais de modificação da qualidade da água ocorrentes em alagados, mangues, pântanos, ou, como podem ser denominados em conjunto, os *wetlands* naturais (SALATI, 2000).

Esses ambientes naturais são ecossistemas únicos, ocorrentes devido a sua localização especial e são reconhecidos por sua elevada produtividade biológica (KADLEC e WALLACE, 2009).

Das principais características dos *wetlands* naturais que os definem como ambientes ótimos para ocorrência de processos biológicos são a presença abundante de água, que favorece a maior parte dos processos biológicos, e a presença de organismos adaptados, notadamente plantas e micro-organismos aptos a confrontar situações de escassez temporária de oxigênio em face a abundância de água (KADLEC e WALLACE, 2009).

Outros fatores importantes são o tipo de solo (material filtrante) e a radiação solar, que, conjuntamente com os fatores supracitados acabam por atribuir aos *wetlands* naturais a capacidade de transformar muitos dos poluentes presentes nos efluentes em subprodutos inócuos ao meio ambiente ou nutrientes essenciais para o desenvolvimento de organismos terceiros.

Marques (1999) propõe que a concepção de WC visa, de fato, otimizar a ciclagem de nutrientes, remoção da matéria orgânica, de princípios ativos e de metais através do favorecimento de condições ótimas para ocorrência dos processos característicos de *wetlands* naturais.

Os principais fatores que conferem aos WC um maior desempenho e flexibilidade em relação aos *wetlands* naturais é o controle hidráulico, tempo de detenção, meio filtrante e favorecimento de crescimento microbiano específico, além de, por serem artificiais, a maleabilidade em termos de dimensionamento e atendimento de necessidades específicas de cada empreendimento.

Os primeiros estudos sobre a utilização de WC aplicados ao tratamento de efluentes foram realizados pelos pesquisadores alemães Seidel e Kickel, focando-se principalmente em efluentes domésticos (IWA, 2000). Até o presente momento, o número de efluentes onde os WCs vem se mostrando eficazes como opção de tratamento aumentou

consideravelmente, englobando efluentes provenientes de diversas origens, tais como: laticínios, têxteis, suinocultura, abatedouro, produzidos em campos de golf, desaguamento de lodo de tanques sépticos, lixiviados de aterro sanitário, processamento de óleo de oliva, curtume, efluente industrial inorgânico, entre outros (VYMAZAL, 2009).

Além da verificação da suscetibilidade de aplicação da tecnologia para tratamento de um efluente em específico, faz-se necessária a compreensão e o aperfeiçoamento do papel dos diversos elementos atuantes no tratamento. Dentre esses, são considerados como prioritários estudos sobre o tipo de fluxo empregado, tipo de material filtrante, tipos de macrófitas plantadas, os máximos carregamentos hidráulicos e orgânicos afluentes suportados, as cinéticas de depuração, a transferência de oxigênio, a estrutura e metabolismo do biofilme aderido ao substrato filtrante e a vida útil do sistema (SEZERINO, 2006). Referente ao controle hidráulico e ao tipo de fluxo empregado, as diferentes derivações são responsáveis pela classificação dos tipos de WC na literatura.

### 3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS WC

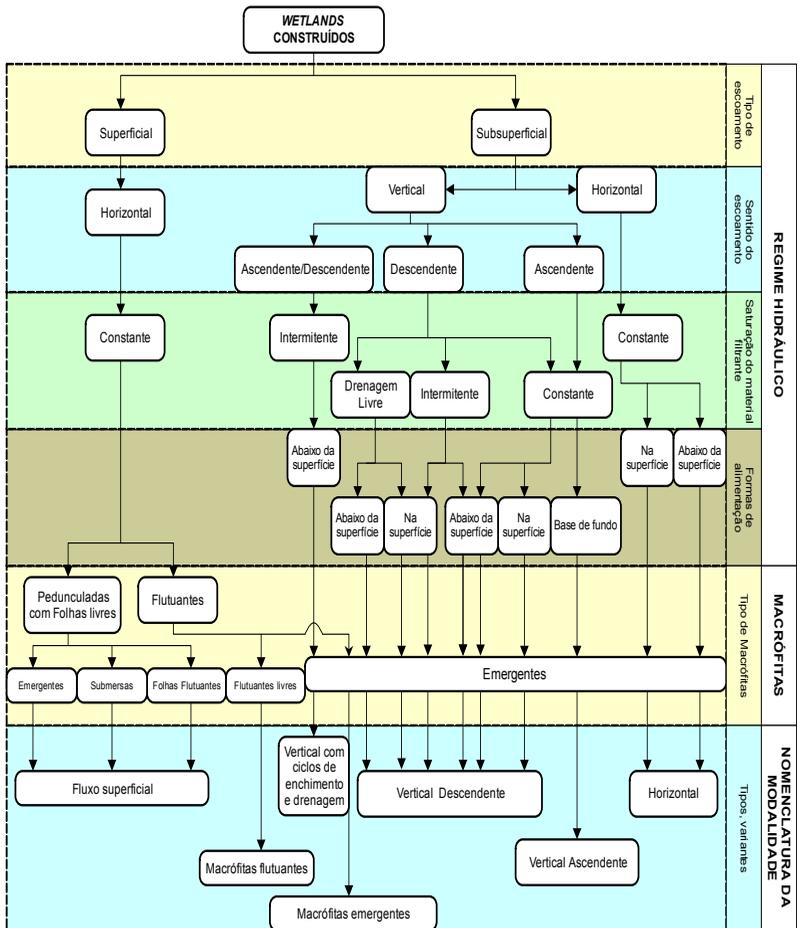
Os WC são classificados em dois grupos de acordo com seu regime hidráulico (FONDER *et al*, 2013), sendo

- I. Sistema de lâmina livre ou de escoamento superficial;
- II. Sistema de escoamento subsuperficial.

Os WC de escoamento superficial ou lâmina livre se assemelham a lagoas com a presença de plantas aquáticas. O fluxo é estritamente horizontal.

Os WC de escoamento subsuperficial são subdivididos de acordo com orientação de fluxo, seja horizontal ou vertical. Ambos possuem material filtrante por onde o efluente a ser tratado percola e há o crescimento de biofilme. Além disso, ambas derivações possuem macrófitas do tipo emergentes. Outras variações quanto ao tipo de alimentação e sentido do fluxo acabam por gerar subclasses desses WCs e são ilustradas na Figura 1.

Neste trabalho, tendo em vista que a avaliação de desempenho será realizada sobre um *Wetland* Construído Horizontal (WCH), um maior detalhamento sobre o seu funcionamento será realizado



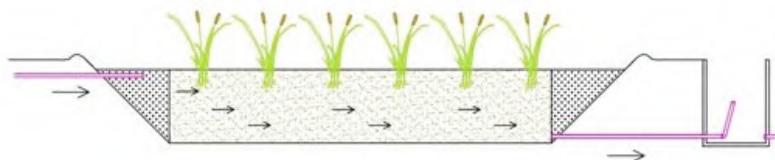
**Figura 1 – Classificação dos wetlands construídos.**  
Adaptado de Fonder *et al.* (2013)

### 3.2.1. *Wetland* Construído Horizontal (WCH)

Os WCH, como enunciado em seu próprio nome, apresentam fluxo horizontal. A força motriz para o escoamento é dada pela gravidade, adotando-se, geralmente, uma declividade de fundo de aproximadamente 1% (PHILIPPI *et al.*, 2007).

A alimentação e saída dos WCH possuem zonas de entrada e saída, também denominadas *inlets* e *outlets*. São compostas geralmente por brita para acomodação das respectivas tubulações e para evitar possíveis colmatações iniciais. Toda a área deve ser impermeabilizada e garantir a estanqueidade do sistema.

Normalmente, a tubulação de entrada encontra-se na parte superior do WCH enquanto que a de saída/drenagem, na parte inferior. O esgoto percola desde a zona de entrada até a de saída através do material filtrante, onde a degradação e remoção de matéria orgânica, nitrogênio e sólidos suspensos será realizada. A tubulação de saída, se situada na parte inferior, geralmente apresenta uma elevação para atuar como controlador de nível do sistema. A Figura 2 esquematiza o fluxo em um WCH.



**Figura 2 – Esquema de um *Wetland* Construído Horizontal**

Nos WCH, o efluente entra em contato com regiões anaeróbias, anóxicas e aeróbias. A disposição do fluxo e o controlador de nível a jusante objetiva em manter o sistema saturado, e consequentemente, em estado anaeróbio/anóxico. Esta disposição também serve para aproveitamento total do volume do WCH (KADLEC e WALLACE, 2009)

As zonas aeróbias concentram-se próximas à rizosfera das macrófitas. Isto ocorre devido ao transporte de oxigênio da atmosfera para ação efetiva das raízes. A liberação de oxigênio ao redor das raízes acaba favorecendo o desenvolvimento de micro-organismos que atuam no processo de tratamento (COOPER *et al.*, 1996; BRIX, 1997).

O desenvolvimento de micro-organismos culmina na formação de biofilme que se adere tanto às raízes das macrófitas, quanto o meio filtrante. As diferentes características do meio promovidas em função da saturação do material filtrante, sendo, anaeróbias, anóxicas e aeróbias, permitem o desenvolvimento de comunidades distintas de micro-organismos, promovendo principalmente a degradação da matéria orgânica carbonácea e transformações do nitrogênio como a nitrificação e desnitrificação nesse sistema. Ressalta-se, porém, que o processo de desnitrificação ocorre muito mais intensamente que a nitrificação (quando o afluyente é previamente nitrificado), justamente devido a maior área anaeróbia que aeróbia nesse sistema (COOPER *et al.*, 1996).

### 3.3. ELEMENTOS ATUANTES

A forma e intensidade de depuração dos efluentes depende de alguns fatores que irão propiciar e otimizar a ocorrência dos processos naturais aos *wetlands*. Em relação à otimização de WC, três são os principais fatores que alteram seu regime.

#### 3.3.1. Macrófitas

As macrófitas são uma vasta gama de organismos, abrangendo desde angiospermas (como a taboa – *Typha* spp.) até algas macroscópicas. São organismos autotróficos fotossintetizantes, o que implica em dizer que são responsáveis pela conversão da energia solar em energia química armazenada em forma de matéria orgânica. A matéria orgânica poderá, então, ser utilizada como fonte de energia seres heterotróficos, como bactérias e fungos (BRIX, 1997).

Além de possuírem este papel motriz da cadeia trófica, as macrófitas possuem elevada importância para a manutenção do equilíbrio ecológico em *wetlands* naturais e para a operação e correto funcionamento de WCs. Brix (1997) identifica algumas de suas funcionalidades frente aos WCs, sendo:

- estabilização da superfície do filtro;
- promoção de boas condições para o processo físico de filtração;
- aeração da rizosfera (região de contato entre solo e raízes);
- promoção de área disponível para aderência de micro-organismos nas raízes;
- remoção de nutrientes devido o requerimento nutricional das plantas;

- manutenção da condutividade hidráulica do meio filtrante;
- embelezamento paisagístico.

Referente à assimilação de nutrientes presentes no esgoto pelas macrófitas, Vymazal (2005) afirma que as macrófitas são capazes de remover cerca de 10% do total de nitrogênio através da tecnologia de WC. Brix (1997) relata um capacidade de remoção através da poda de 200 a 2500 kgN/ha.ano.

A nível global, observa-se uma recorrência de três tipos de macrófitas mais empregadas em WC: *Phragmites australis* (não nativa do Brasil), *Typha* spp., *Juncus* spp. Todas são classificadas como emergentes, possuindo uma taxa de crescimento de muito rápida a moderada, respectivamente, e densidades consideradas como densas (COOPER *et al.*, 1996).

Apesar das macrófitas acima descritas serem as mais implantadas, os fatores determinantes para escolha da planta a ser utilizada são outros. Tendo em vista o caráter ecológico e de baixo custo dessa tecnologia, fatores como a presença das plantas na localidade, o custo de plantio e manutenção (poda regular) são importantíssimos, sempre levando-se em consideração a sua tolerância a saturação de água e a matéria orgânica para um bom funcionamento do sistema.

No local em estudo, CETRAG, foi identificado por Philippi *et al.*, (2007) a macrófita utilizada no sistema como sendo da família *Poecae*, do gênero *Zizaniopsis*. A família *Poaceae* possui distribuição cosmopolita, incluindo 650 gêneros e 9000 espécies, sendo que no Brasil ocorrem cerca de 180 gêneros e 1500 espécies. É a principal família de Angiospermas, do ponto de vista econômico (SOUZA e LORENZI, 2005). *Zizaniopsis* é um gênero pequeno composto por cinco espécies neotropicais, distribuído dos Estados Unidos Meridional até a Argentina. Todo o gênero está adaptado à habitats de transição entre o ambiente aquático e o terrestre, sendo caracterizado por plantas perenes, rizomatosas e eretas. Dentro deste gênero, duas espécies são mais frequentes no estado de Santa Catarina: *Z. microstachya* e *Z. Bonariensis*. Não há discriminação da espécie plantada no sistema, sendo necessário uma nova amostragem para tal definição.

### **3.3.2. Material Filtrante**

O material filtrante, além de servir como elemento de sustentação das macrófitas, atua como filtro por onde o efluente irá

percolar em seu trajeto dentro do sistema. É no material filtrante que a maioria das reações bioquímicas se desenvolvem, além de atuar como suporte para desenvolvimento do biofilme microbiano.

Os primeiros estudos realizados na Alemanha por Kickuth e colaboradores utilizaram o solo *in natura* como material filtrante. A sua restrição, contudo, se dá que, muitas vezes, as características de condutividade hidráulica e adsorção de nutrientes não corresponda ao desejado. Dessa forma, a substituição do solo em natura por materiais filtrantes diversos torna-se necessária para otimização do sistema.

Idealmente, o material filtrante deve possuir características, expressas basicamente em sua granulometria, que permitam um bom fluxo em seu interior e evite colmatações indesejadas, conciliado a um potencial reativo que permita a adsorção de compostos inorgânicos presentes no esgoto (como a amônia  $\text{NH}_4^+$  e o ortofosfato  $\text{P-PO}_4^{3-}$ ).

Contudo, a associação de ambas as características em um único material de fácil acesso não é evidente. As areias, por exemplo, possuem ótima condutividade hidráulica, mas teores baixos de reatividade; as argilas, por sua vez, ótima capacidade de adsorção mas são praticamente impermeáveis. Assim, ocorre geralmente a combinação de materiais, condicionada à finalidade do tratamento.

A literatura recomenda, para finalidades de tratamento secundário e terciário de esgotos domésticos, a utilização de areias e britas. Sua escolha se dá, também, pela maior facilidade de caracterização, sendo recomendado a escolha de materiais que possuam (COOPER *et al.*, 1996; PLATZER, 1999; ARIAS *et al.*, 2001):

- diâmetro efetivo ( $d_{10}$ ) superior ou igual a 0,20mm;
- coeficiente de uniformidade (U) menor ou igual a 5 unidades;
- coeficiente de permeabilidade, ou condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ), maior ou igual a  $10^{-4}\text{m/s}$  ( $\geq 10^{-2}\text{cm/s}$  ou  $\geq 0,36\text{m/h}$ ).

O diâmetro efetivo, ou ainda  $d_{10}$ , é definido como o diâmetro correspondente a 10% em peso total das partículas menores que ele (CAPUTO, 1996). A curva granulométrica do material pode ser definida a partir desse índice, sendo, em seguida, possível prever o coeficiente de uniformidade e a condutividade hidráulica teórica do objeto em estudo.

### 3.3.3. Micro-organismos

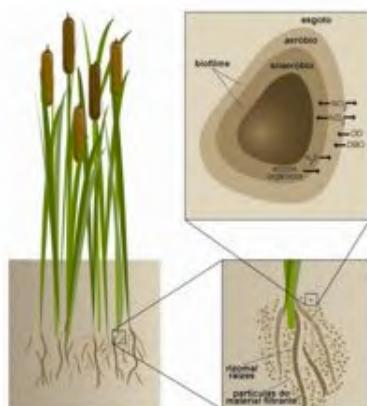
Em ambientes como os *wetlands* a proliferação de micro-organismos é muito alta. Restringindo a análise em direção aos seres responsáveis pelo consumo de matéria carbonácea e pelas transformações das séries nitrogenadas, o grupo das bactérias destaca-se.

O surgimento das comunidades de bactérias está intimamente ligado às condições do ambiente em seu entorno, em termos de disponibilidade de oxigênio e carbono, temperatura, potencial redox do meio e material suporte. O material filtrante é o responsável por propiciar local de fixação das comunidades bacterianas, formando o chamado biofilme (KADLEC e WALLACE, 2009).

O biofilme pode ser definido como um conjunto de micro-organismos e de produtos extracelulares que se aderem sobre um suporte sólido, formando uma camada volumosa e espessa, com uma estrutura externa não totalmente regular e uniforme (COSTA, 1989).

Segundo Truu *et al.*(2009), partículas menores como a argila, apresentam maiores capacidades de proteção da biomassa microbiana, fornecendo uma grande área de superfície para interações micro-organismos e o efluente.

A interação ao longo do biofilme com o esgoto se dá de forma diferenciada devido à variação do gradiente de oxigênio dissolvido no meio. Von Sperling (1996) afirma que, com a entrada de oxigênio no biofilme, este é consumido gradualmente até que parte da comunidade bacteriana se encontre em situações anóxicas ou anaeróbias (Figura 3)



**Figura 3 - Disposição das camadas aeróbias e anaeróbias no biofilme.**

**Fonte: Olijnyk (2008).**

Diferentes processos ocorrerão em cada uma das camadas. As regiões aeróbias serão responsáveis pela oxidação do nitrogênio amoniacal em nitrito e em seguida em nitrato. Na camada anóxica ocorrerá a desnitrificação e nas regiões anaeróbias ocorrerá a formação de ácidos orgânicos e a redução de sulfatos. Segundo MetCalf & Eddy (2003), a coexistência entre condições aeróbias, anóxicas e anaeróbias é uma importante característica dos sistemas com biofilmes.

### 3.4. TRANSFORMAÇÃO E REMOÇÃO DE POLUENTES EM WCH

A remoção de poluentes são decorrentes de processos específicos nos WCH. Na **Tabela 1** discrimina-se por parâmetros de qualidade os processos responsáveis por sua transformação dentro dos sistemas.

**Tabela 1 - Transformação e remoção de poluentes em WCH.**

<b>Poluentes</b>	<b>Processo</b>
Matéria Orgânica particulada	- Sedimentação e filtração, convertido a DBO solúvel;
Matéria Orgânica Solúvel	- Fixação pelo biofilme bacteriano, posteriormente degradação. - Filtração;
Sólidos Suspensos	- Decomposição por bactéria do solo especializada durante longo tempo de retenção.
Nitrogênio	- Atividade microbiana - Baixa amonificação - Baixa nitrificação - Alta desnitrificação - Assimilação microbiana - Assimilação pela planta - Adsorção da amônia
Fósforo	- Adsorção no material filtrante - Assimilação pelas macrófitas; - Precipitação química;
Patógenos	- Filtração - Predação - Absorção

**Tabela 1 - Transformação e remoção de poluentes em WCH.**

<b>Poluentes</b>	<b>Processo</b>
Metais pesados	- Adsorção - Assimilação pelas macrófitas
Compostos orgânicos	- Adsorção pelo biofilme e material filtrante; - Decomposição por bactérias devido ao longo tempo de retenção;

**Fonte: Adaptado de Hoffmann e Platzer (2010) e Vymazal (2009)**

### 3.5. DESEMPENHO DE WCH

A adoção de WCH como solução de tratamento de efluentes já acontece de forma cada vez mais recorrente em diversas áreas de tratamento para uma gama diversificada de efluentes. Por este trabalho se tratar do tratamento de efluentes domésticos, o desempenho de WCH aqui descrita se limitará a esta faixa do espectro de utilização.

A performance dos sistemas é função da taxa de aplicação hidráulica ao sistema, a carga aplicada, localidade (condições climáticas), tipo de macrófitas plantada, área superficial e tempo de operação. Os principais parâmetros analisados para medição do desempenho do sistema são Sólidos Suspensos (SS), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Nitrogênio Amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ), Fosforo Total (PT) e Ortofosfato ( $\text{P-PO}_4^{3-}$ ). Na Tabela 2 apresentam-se desempenhos de WCH em diversas localidades.

**Tabela 2 - Dados de desempenho de WCH utilizados para o tratamento de águas residuárias domésticas.**

Autor	Local	Área (m <sup>2</sup> )	Material Filtrante	Vazão Afluente (m <sup>3</sup> /d)	Carga Aplicada (g/m <sup>2</sup> .d) <sup>1</sup>					% Remoção de concentração				
					SS	DBO	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	PT	SS	DBO	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	PT
Sardón <i>et al.</i> (2006)	Carrión de los Cespedes, Espanha	229	-	5,8	7,70	12,99	2,13	-	0,37	89	83	42	-	25
Stewart (2005)	Pisgah, Jamaica	90	Brita	0,9	0,57	0,27	0,06	-	0,10	77	52	93	-	96
Costa <i>et al.</i> (2013)	Belo Horizonte, Minas Gerais	72.3	Escória de aço	8,2	5,78	9,41	3,29	-	0,36	82	70	7	-	28
Philippi <i>et al.</i> (2006)	Videira, Santa Catarina	50	Areia grossa, saibro, casca de arroz e argila	-	-	-	-	-	-	-	79	55	40	-
Philippi <i>et al.</i> (2006)	Balneário Camburiú, Santa Catarina	16	Areia grossa, saibro, casca de arroz e argila	-	-	-	-	-	-	86	57	20	42	-
Philippi <i>et al.</i> (2006)	Tubarão, Santa Catarina	72	Areia grossa, saibro, casca de arroz e argila	-	-	-	-	-	-	82	92	48	65	-
Philippi <i>et al.</i> (2006)	São Joaquim, Santa Catarina	33.6	Areia grossa, saibro, casca de arroz e argila	-	-	-	-	-	-	57	75	33	55	-

**Tabela 2 - Dados de desempenho de WCH utilizados para o tratamento de águas residuárias domésticas**

Autor	Local	Área (m <sup>2</sup> )	Material Filtrante	Vazão Afluente (m <sup>3</sup> /d)	Carga Aplicada (g/m <sup>2</sup> .d)					% Remoção da concentração				
					SS	DBO	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	PT	SS	DBO	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	PT
Sezerino (1999)	Florianópolis, Santa Catarina	4	Casca de Arroz, brita, areia e solo local (argila - areia)	0.75	1,16	49,55	5,38	10,0	-	-	87	74	92	-
Watson (1990)	Alabama, EUA	2035	-	14.9	0,53	0,07	0,08	-	0,38	95	89	74	-	93
Sezerino (2006)	Potecas, Santa Catarina	10	Areia grossa	0.83	6,21	9,08	1,72	0,26	-	84	61	17	0	-
Sezerino (2006)	Potecas, Santa Catarina	10	Areia grossa	0.62	5,18	-	1,69	0,22	-	84	-	23	0	-

<sup>1</sup> Carga aplicada em função da vazão média e área superficial dos WCH.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. DESCRIÇÃO DO LOCAL EM ESTUDO

O Centro de Treinamento de Agronômica (CETRAG) está localizado no município de Agronômica (latitude: 27°15'54''S e longitude: 49°42'40''W), a 347 metros de altitude e apresenta temperatura média anual de 25°C. O município está localizado na região do Alto Vale do Itajaí, dentro da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu (Figura 4)



**Figura 4 – Localização do CETRAG no município de Agronômica**  
**Fonte: Adaptado de SIRHESC e Google Earth.**

O CETRAG (Figura 5) pertence à Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI) e tem como objetivo o auxílio à consolidação de uma rede de difusão de informações, tecnologias e pesquisa voltada, majoritariamente, à agricultura familiar.

O Centro de Treinamento utiliza-se, principalmente, de eventos de capacitação para alcance de seu objetivo, além de atuar como local de reuniões para órgãos, comitês e grupos afins, e de visita para

demonstração de tecnologias de interesse para regiões rurais. Dessa forma, o principal tipo de efluente gerado é doméstico, oriundo de atividades sanitárias e de cozinha. Tais efluentes requerem tratamento prévio a seu lançamento para atendimento dos padrões de lançamento das resoluções ambientais.



**Figura 5 - Centro de Treinamento de Agrônômica, CETRAG.**

Dessa forma, foi desenvolvido um sistema descentralizado de tratamento de efluentes, implantado e operante desde 1994, que, além de regularizar o padrão de qualidade do efluente do Centro, é palco de visitação no CETRAG. O sistema é utilizado para exemplificar de forma prática tecnologias de saneamento voltadas para ambientes rurais.

O sistema é composto por uma caixa de gordura, seguido por tanque séptico, finalizando seu tratamento com um *wetland* construído horizontal (WCH) que despeja seu efluente em uma lagoa com peixes.

## 4.2. SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM ESTUDO

### 4.2.1. Dimensionamento do sistema

O sistema de tratamento de efluentes foi dimensionado para atender 200 pessoas e teve início de operação no dia 13 de janeiro de 1994. O dimensionamento do sistema considerou, também, o consumo de 6 litros de água para cada litro de leite processado na indústria artesanal, sendo, na época de projeto do sistema, produzidos 200L.leite/dia, de 2<sup>a</sup> a 5<sup>a</sup> feira. Todas as informações sobre o dimensionamento do sistema foram obtidas através do Relatório Final de Eficiência de Sistemas de Tratamento geridos pela EPAGRI (PHILLIPI *et al.*, 2007)

O tanque séptico foi dimensionado conforme as recomendações da NBR 7229/82 (ABNT, 1982), resultando nas seguintes dimensões:

- Comprimento total: 4,00m;
- Comprimento da primeira câmara: 2,80m;
- Comprimento da segunda câmara: 1,20m;
- Largura: 2,00m;
- Profundidade útil: 1,70m;
- Profundidade total: 2,10m;
- Volume útil: 13,6m<sup>3</sup>.

A frequência de limpeza adotada no dimensionamento do Tanque Séptico foi de 4 anos. O WCH foi dimensionado arbitrando-se os seguintes parâmetros de projeto:

- Velocidade de infiltração de água no solo:  $k_f = 1,7 \times 10^{-5}$  m/s;
- Largura dos módulos de infiltração:  $B_{total} = 13$  m;
- Altura média do corpo filtrante:  $P = 0,60$  m;
- Seção transversal do módulo:  $A = P \times B_{total} = 0,60 \times 13 = 7,8$  m<sup>2</sup>;
- Comprimento do módulo:  $L = 26$  m;
- Gradiente hidráulico adotado:  $J = 0,01$  m/m.

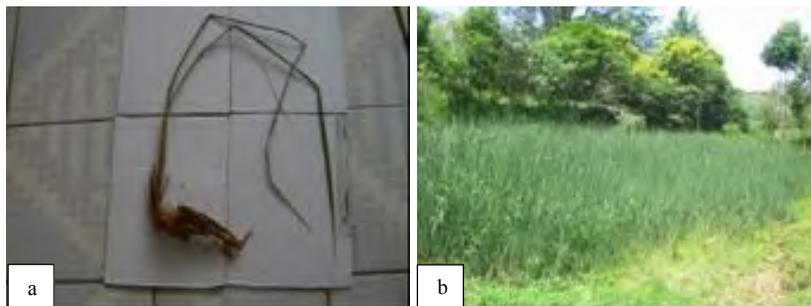
Considerando-se que o projeto foi desenvolvido para 200 pessoas e que a área superficial do WCH, de acordo com os parâmetros de projeto, é de aproximadamente 340 m<sup>2</sup>, obtêm-se a relação de 1,7m<sup>2</sup>/pessoa.

A escolha do material filtrante foi realizada levando-se em conta a capacidade de infiltração do solo. Esta foi determinada através do método dos cilíndricos concêntricos, seguindo a NBR 7229/82. Utilizando-se a Lei de Darcy ( $Q = k_f \times J \times A$ ), obteve-se uma vazão igual a 0,08m<sup>3</sup>/d, que se traduz em uma capacidade de infiltração insuficiente do solo. Assim, faz-se necessária a substituição do solo original por um substrato filtrante que favoreça a condutividade hidráulica do sistema. Para esse sistema, adotou-se 3 materiais filtrantes:

- saibro ( $k_f = 1,0 \times 10^{-2}$ );
- areia ( $k_f = 1,0 \times 10^{-3}$ );
- casca de arroz ( $k_f = 4,0 \times 10^{-3}$ ).

A verificação da nova vazão infiltrada considerou o maior  $k_f$  dos materiais adotados (arroz), resultando, ainda assim, em uma vazão igual a  $26,96\text{m}^3/\text{d}$ , sendo o necessário para atender a vazão gerada no CETRAG.

A Macrófita plantada no WCH pertence à família *Poaceae* (*Gramineae*) e ao gênero *Zizaniopsis* e é ilustrada na Figura 6 (PHILIPPI *et al.*, 2007).



**Figura 6 – Macrófita empregada no WCH em estudo.**

**a) Amostra da macrófita do CETRAG, realizada em 2005.**

**b) Macrófitas plantadas sobre o WCH do CETRAG, 2005.**

**Fonte: Philippi *et al.* (2007)**

#### **4.2.2. Aspectos construtivos e disposição do sistema**

O sistema de tratamento está localizado na porção sudeste da propriedade do CETRAG. O tanque séptico situa-se imediatamente a montante do WCH. O tanque séptico é de concreto e sua inspeção é realizada diretamente sobre ele (Figura 7).



**Figura 7 - Tanque séptico enterrado.**

A jusante do tanque séptico, após realização de duas curvas de 90° no plano horizontal, a tubulação afluyente ao WCH entra no subsolo e alimenta a zona de raízes. Assim, o direcionamento do efluente do WCH se dá no sentido oposto ao de chegada no tanque séptico, dispondo o sistema de forma compacta.

Diretamente em frente à zona de raízes, há um poço que permite a amostragem do efluente tratado no WCH e que, também, permite a elevação do nível de saturação dentro do sistema. A tubulação segue por debaixo da terra e despeja o efluente tratado em uma lagoa onde há criação de peixes (Figura 8).

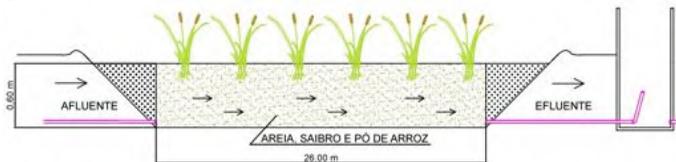


**Figura 8 – Pontos de coleta do sistema em estudo.**

**a) Ponto de coleta afluyente ao WCH.**

**b) Ponto de coleta efluente ao WCH.**

Diferentemente do usualmente empregado para WCH, a tubulação afluyente não se encontra imediatamente abaixo da superfície; a alimentação do sistema ocorre a partir de seu fundo (a uma profundidade de aproximadamente 60cm), o que acaba por favorecer um fluxo mais concentrado em sua parte inferior. Este formato é o que a EPAGRI classicamente adotava em seus projetos. A Figura 9 representa um esquema do *wetland* em estudo.



**Figura 9 - Esquema do WCH do CETRAG.**

**Desenho fora de escala.**

### 4.3. LEVANTAMENTO DE DADOS

#### 4.3.1. Dados de Qualidade do Efluente

Para realização da avaliação do desempenho do WCH implantado no CETRAG, foi necessário o levantamento de dados de monitoramentos anteriores. O monitoramento se deu de forma intermitente ao longo dos 20 anos de operação. No total, 3 campanhas foram realizadas para medição de eficiência de tratamento do WCH.

Philippi *et al.*, (1999), realizaram a primeira campanha no início de operação do sistema, de Julho/94 a Julho/95. Ao total, 12 amostragens foram feitas, sendo cada uma realizada mensalmente. Foram coletados 3 pontos, sendo o primeiro referente ao esgoto bruto, o segundo após o tanque séptico, e o terceiro, após o WCH.

Philippi *et al.*, (2007), realizaram a segunda campanha dez anos após o início de operação do sistema, de Outubro/2005 a Outubro/2006. Foram, também, realizadas 12 coletas. Foram amostrados dois pontos: o primeiro imediatamente após o tanque séptico, caracterizando o afluente ao WCH, e, o segundo, após o WCH, caracterizando o efluente do WCH.

A terceira campanha foi iniciada em Setembro/2014 e tem continuidade prevista até, no mínimo, Dezembro/2014. Deseja-se manter o monitoramento até Setembro/2015 para geração de um ano de monitoramento similar às campanhas anteriores. A coleta é realizada mensalmente e as análises laboratoriais são realizadas no Laboratório Integrado do Meio Ambiente – LIMA, UFSC. Neste trabalho, estarão incluídas as medições de Setembro a Novembro de 2014.

#### 4.3.2. Dados de Vazão da terceira campanha

Em relação à vazão, o método utilizado para determinação da vazão afluente ao sistema foi o indireto. Para tal, foram obtidos junto à secretaria do CETRAG o histórico de visitação. Posteriormente, os dados foram trabalhados utilizando coeficientes da literatura de consumo *per capita* para a atividade em questão.

As vazões das campanhas anteriores, de Julho/94 a Julho/95 e Outubro/2005 a Outubro/2006 não foram calculadas, pois o CETRAG não possui registro das visitas antigas. Dessa forma, para análise do desempenho do sistema, pôde-se considerar somente as vazões

contribuintes durante a campanha atual, especificamente no período de fevereiro/14 a novembro/14.

#### 4.4. ESTIMATIVA DE VAZÃO DURANTE A TERCEIRA CAMPANHA

A estimativa de vazão foi realizada utilizando coeficientes de consumo de água da literatura para setores hoteleiros com cozinha, os quais são os que mais se aproximam das atividades geradoras atuais de efluente do CETRAG. Uma discriminação em relação ao número de visitantes que somente passavam o dia e visitantes que pernoitavam foi realizada. Na Tabela 3 apresenta-se os coeficientes adotados. Considerou-se que toda água consumida tornar-se-ia efluentes destinados ao sistema de tratamento.

**Tabela 3 - Coeficientes de consumo de água por atividade comercial. O valor apresentado indica o intervalo identificado pelos autores e o valor entre parênteses como o valor indicado**

Parâmetros	Valor	Unidade
Hotel – diário	30 – 49 (38)	L/dia.hóspede
Hotel - pernoite	151 – 227 (187)	L/dia.empregado

**Fonte: MetCalf e Eddy (1991).**

Por meio dos dados de visitação temporária e pernoite do estabelecimento, construiu-se as curvas de vazão afluente ao sistema. Fora os visitantes, o estabelecimento conta com 2 funcionários fixos na parte matutina/vespertina e 2 funcionários noturnos, que também contribuem ao sistema.

#### 4.5. ANÁLISES LABORATORIAIS

As análises de qualidade do afluente e efluente do WCH, para os dados da terceira campanha, realizada a partir de Setembro/2014, foram realizadas no Laboratório Integrado do Meio Ambiente – LIMA/UFSC. Os procedimentos utilizados para análise de cada parâmetro foram embasados em metodologias propostas pela literatura, estando estas explicitadas na Tabela 4. Na Tabela 5 apresenta-se as faixas de leitura juntamente com a regressão linear de cada parâmetro colimétrico analisados.

**Tabela 4 - Metodologia adotada para cada um dos parâmetros analisados.**

<b>Parâmetros</b>	<b>Metodologia empregada</b>
pH	Direto, Potenciométrico, pHmetro digital, modelo B474 - MICRONAL
DQO (mg/L)	Refluxo fechado, APHA, (2005)
Alcalinidade (mg/L)	Método Titulométrico - APHA, (2005)
SS (mg/L)	Método gravimétrico – APHA,(2005)
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	Método Nessler - Vogel, (1981)
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Método Alfaftilamina – APHA, (1998)
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Kit Hach – APHA, (2005)

**Tabela 5 - Faixas de leituras por parâmetro analisado.**

<b>Constituinte</b>	<b>Método</b>	<b>Faixa de leitura</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Nessler	0-12 (mg/L)	0,9951
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Alfaftilamina	0-1 (mg/L)	0,9981
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Kit Hach	0-27 (mg/L)	0,9925
P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Ácido Vanadomolibdato	0-36 (mg/L)	0,9924

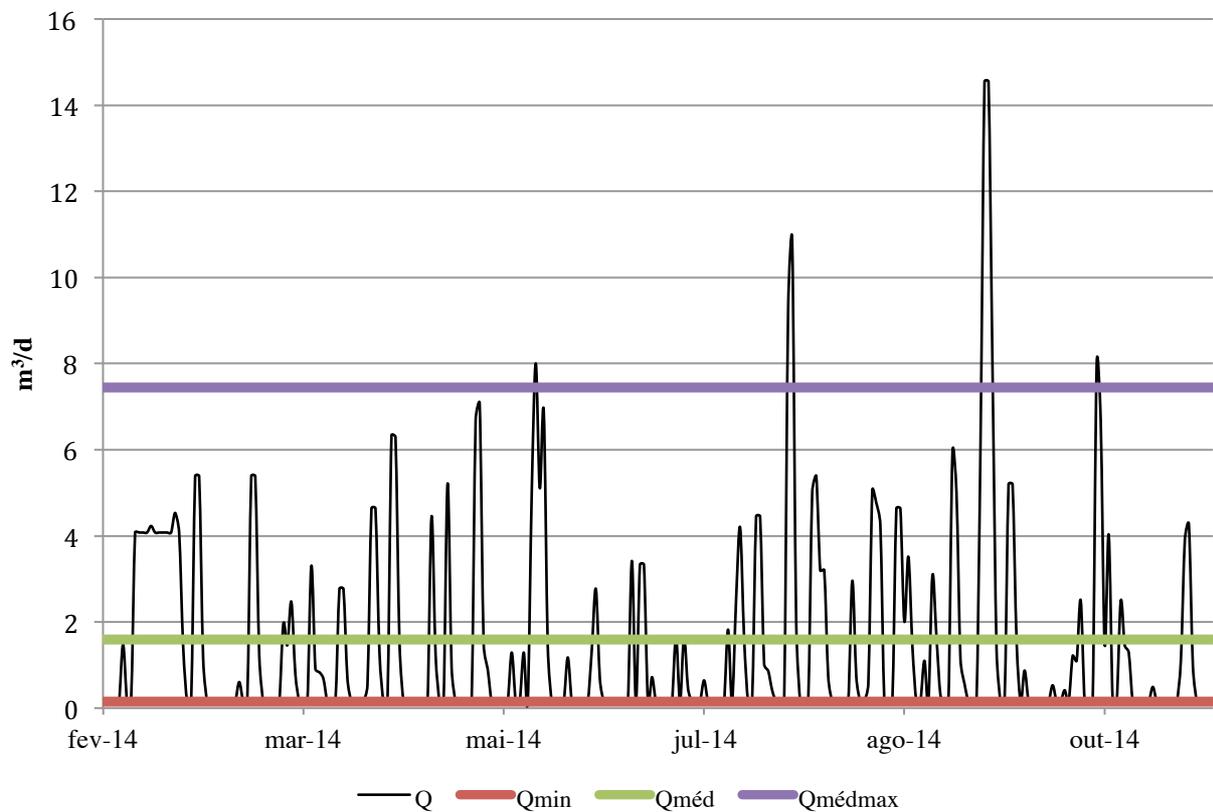
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. VAZÕES APLICADAS AO SISTEMA DURANTE A TERCEIRA CAMPANHA

Obteve-se, como esperado, uma alta variação de contribuição ao sistema ao longo dos dias. Essa variação se dá, justamente, devido ao caráter de geração intermitente do centro, com geração predominantemente concentrada durante a realização de eventos e capacitações. Na Figura 10 apresenta-se a variação de vazão aplicada entre o período de 01/02/2014 a 31/10/2014.

A vazão possui valor mais recorrente, em 54% do período de amostragem, igual a vazão mínima registrada de  $0,152 \text{ m}^3/\text{d}$ , situação onde não há ocorrência de nenhum evento no centro. Como valores máximos, o maior valor registrado no período como um todo foi igual a  $14,55 \text{ m}^3/\text{d}$  e a média dos valores máximos mensais foi de  $7,45 \text{ m}^3/\text{d}$  com desvio padrão de  $3,77 \text{ m}^3/\text{d}$ . O valor médio global foi de  $1,59 \text{ m}^3/\text{d}$  com desvio padrão de  $2,35 \text{ m}^3/\text{d}$ , coerente com a alta intermitência do sistema.

Os dados de visitação e vazão podem ser utilizados para caracterizar o sistema. Para definição da relação de metros quadrados de WC por pessoa contribuinte, considerando que o CETRAG possui somente 50 leitos e que, de acordo com os dados de visitação de fevereiro a novembro de 2014, a média e o máximo de pessoas por dia no Centro foi de 19 e 112, respectivamente, obtêm-se as relações área/pessoa iguais a 3,04 e  $18,04 \text{ m}^2/\text{pessoa}$ , respectivamente.



**Figura 10 - Variação de contribuição de vazão ao longo do período de fevereiro a novembro/2014.**

## 5.1. DESEMPENHO DO SISTEMA

O desempenho do sistema foi avaliado comparando-se as eficiências de remoção médias das 3 campanhas realizadas ao longo dos 20 anos de operação do WCH.

### 5.1.1. Primeira campanha

Para análise de desempenho durante a campanha de Julho/1994 a Julho/1995, utilizou-se os dados de Philippi *et al.* (1999), representados na Tabela 6.

**Tabela 6 – Resultados médios e desvio padrão (DP) referente os resultados físico-químico e biológico obtidos durante a campanha de 1994-1995.**

Parâmetros *n= 12	Ponto 1 Bruto		Ponto 2 Afluente		Ponto 3 Efluente		Remoção Ponto 2-3
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	%
pH	-	6,6 ±0,2	6,2 ±0,4		6,6 ±0,2		-
DQO	mg/L	1045 ±222	695 ±196		302 ±143		57%
DBO	mg/L	449 ±75	306 ±49		138 ±62		55%
ST	mg/L	1083 ±180	771 ±90		427 ±164		45%
SV	mg/L	673 ±156	434 ±40		168 ±93		61%
SST	mg/L	119 ±32	180 ±46		74 ±25		59%
SSV	mg/L	84 ±19	122 ±50		36 ±18		70%
NT	mg/L	224 ±73	212 ±61		50 ±21		76%
PT	mg/L	47 ±18	41 ±17		13 ±3		68%
N-NO <sub>3</sub>	mg/L	10 ±0,9	6 ±1,7		2 ±2,5		-

\*n = número de amostragens válidas.

**Fonte: Philippi *et al.* (1999).**

Apesar do esgoto apresentar baixa degradabilidade orgânica, expressa pela relação DBO/DQO  $\cong$  0,4, o WCH apresentou ainda assim uma remoção média de DQO de 57%.

A diminuição do N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> pode estar associada a três fatores: a desnitrificação, visto que o WCH apresenta grande potencial para a realização desta via bioquímica (COOPER, 1996), a adsorção deste íon

no material filtrante e, também, a assimilação pelas macrófitas por meio do requerimento nutricional (VYMAZAL, 2005; BRIX, 1997).

O sistema apresentou uma boa remoção de NT, na ordem de 70%. Porém, o sistema demonstrou uma baixa remoção de SST, influenciado, também, pelo baixo desempenho do tanque séptico.

Segundo a lei estadual 14.765/09 (SANTA CATARINA, 2009), que institui o Código Estadual do Meio Ambiente de Santa Catarina e que é a principal legislação a ser atendida para lançamentos de efluentes em corpos hídricos em Santa Catarina, o efluente nesta primeira campanha estaria irregular no quesito de fósforo total, por apresentar concentração superior a 4mg/L e eficiência inferior a 75%, para lançamento em corpos hídricos interiores, lagoas e estuários. O sistema também apresentou baixa eficiência em relação ao parâmetro DBO, estipulado de concentração máxima de 60mg/L ou remoção superior a 80%.

Referente ao CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005), este estabelece somente relação com nitrogênio amoniacal com o valor máximo de lançamento de 20mgN/L. A classificação de acordo com a classe de corpos receptores requer a vazão de saída do sistema e do corpo receptor para estimativa da concentração de mistura.

### **5.1.2. Segunda campanha**

Para análise de desempenho durante a campanha de Outubro/2005 a Outubro/2006, utilizou-se os dados médios de Philippi *et al.* (2007), representados na Tabela 7.

O WCH apresentou um elevado teor de remoção de matéria carbonácea, expressos pelas taxas de remoção de 98% e 97% para DQO e DBO, respectivamente. A remoção de sólidos também apresentou uma boa remoção média, de 84%.

Ressalta-se a remoção de amônia e fósforo, que, apesar de apresentarem boas médias, de 70 e 76% respectivamente, apresentam desvio padrão elevado para o efluente do WCH.

O consumo de alcalinidade indica a ocorrência de um ambiente oxidativo, o que reflete-se na baixa redução de  $\text{NO}_3^-$ .

A remoção de nitrogênio amoniacal nesse período, visto que não houve nitrificação, pode estar associada à assimilação pelas macrófitas (VYMAZAL, 2005; BRIX, 1997) ou à adsorção no material filtrante e à formação do biofilme

**Tabela 7 – Resultados médios e desvio padrão (DP) referente aos resultados físico-químico e biológico obtidos durante a campanha de 2005-2006**

Parâmetros *n=12	Ponto 1 Afluente		Ponto 2 Efluente		Remoção Ponto 2-3	
	Média	DP	Média	DP	%	
pH	-	5.6	±0.9	6	±0.8	-
Alcalinidade (mgCaCO <sub>3</sub> /L)		292	±98	186	±130	-
Acidez (mgCaCO <sub>3</sub> /L)		47	±20	19	±5	60%
Turbidez (NTU)		219	±20	187	±160	15%
DQO (mg/L)		1699	±944	30	±21	98%
DBO (mg/L)		993	±402	31	±25	97%
SS (mg/L)		274	±205	45	±30	84%
ST (mg/L)		882	±265	495	±202	44%
STF (mg/L)		495	±173	305	±167	38%
STV (mg/L)		388	±211	189	±144	51%
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)		61.5	±31.5	18.5	±56.5	70%
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)		0.08	±0.05	0.05	±0.08	-
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)		3.03	±3.41	1.94	±2.32	-
P-PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/L)		31.4	±12	7.4	±33.9	76%
Coli Total (NMP/100mL)		1.91E-06	±0	2.57E-04	±0	134E+02
<i>E. Coli</i> (NMP/100mL)		9.06E-04	±0	7.32E-02	±0	7.98E+01

\*n = número de amostragens válidas

**Fonte: Philippi *et al.* (2007).**

A remoção de 2 logs de *E. Coli*, podem ser considerados significativos, visto que o sistema é um filtro e não possui fase físico-química. Esta redução, portanto, reflete o desenvolvimento de um microecossistema com diferentes níveis tróficos, ocorrendo predação desses organismos. Além da predação, os processos de sedimentação e radiação solar, atuam na remoção de organismos patogênicos nesses sistemas (KADLEC e WALLACE, 2009).

Comparando-se com a lei estadual 14.765/09, o parâmetro fósforo permite o lançamento em corpos interiores, lagos, lagoas e estuários, uma vez que possui remoção superior a 75%. O parâmetro DBO está adequado conforme o mesmo papel legal, com concentração inferior a 60mg/L além de possuir remoção superior a 80%.

Em relação ao CONAMA 357/05, o lançamento de  $\text{N-NH}_4^+$  está dentro da faixa de até 20mgN/L. A classificação de acordo com a classe de corpos receptores requer a vazão de saída do sistema e do corpo receptor para estimativa da concentração de mistura.

### 5.1.3. Terceira campanha

A terceira campanha remete-se a três visitas que foram realizadas, em setembro, outubro e novembro de 2014. Os resultados médios obtidos estão expressos na Tabela 8. O Apêndice A possui a discriminação dos parâmetros de forma mensal.

**Tabela 8 - Caracterização físico-química obtida durante a campanha de 2014.**

Parâmetros *n= 3	Ponto 1 Afluente		Ponto 2 Efluente		Remoção Ponto 1-2 %
	Média	DP	Média	DP	
<b>pH</b>	5.8	±0.6	6.2	±0.30	-
<b>Alcalinidade (mg/L)</b>	137	±75	196	±32	-
<b>DQO (mg/L)</b>	880	±225	109	±56	88%
<b>SS (mg/L)</b>	77	±25	78	±10	-2%
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg/L)</b>	57,8	±10.4	5,8	±3.1	90%
<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/L)</b>	2,38	±2.27	0,10	±0.14	-
<b>N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (mg/L)</b>	0,07	±0.09	0,00	±0.14	-
<b>P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (mg/L)</b>	38	±6,13	0,67	±0,94	98%

\*n = número de amostragens válidas

Nas análises realizadas na campanha de 2014, o sistema apresentou liberação de sólidos no efluente, como pode se observar no parâmetro SS. Isso também foi de fácil visualização durante a coleta de amostras, visto a elevada turbidez no afluente do sistema (Figura 11).



**Figura 11 - Afluente (à esquerda) e efluente (à direita) do WCH de Agronômica.**

Esta baixa eficiência em remoção de sólidos provavelmente está atrelado ao carregamento inesperado de argila sobre o WC, como também pode ser reflexo do longo período de operação do sistema. Entretanto, mesmo dada tal situação adversa, o sistema conseguiu apresentar uma boa remoção média de DQO, de 88%.

Em 2013, foi iniciado no terreno vizinho ao CETRAG, um loteamento de um condomínio particular. Visando ao nivelamento do terreno para venda, foi necessária a realização de um aterro. A movimentação de terra associada às chuvas intensas durante o período, acabaram por carrear uma grande quantidade de material argiloso para cima do WCH, causando um impacto considerável em relação a composição do material filtrante do WCH. A modificação do substrato se deu a profundidades consideráveis, abrangendo quase a totalidade do sistema (Figura 12).

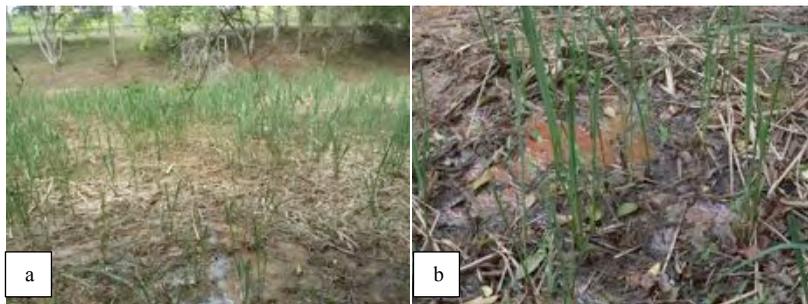


**Figura 12 – Estado atual do sistema.**

**a) análise do material filtrante resultou em coleta praticamente exclusiva de argila.**

**b) Vista geral a partir da saída do sistema; visualiza-se a modificação gramíneas no terreno, decorrente do carregamento de argila.**

A modificação da condutividade hidráulica do sistema resultou no aparecimento de escoamento superficial e empoçamentos junto às macrófitas do sistema (Figura 13).



**Figura 13 – Modificação da superfície do WCH.**

**a) Superfície do WCH após o carreamento de argila.**

**b) Surgimento de empoçamentos de esgoto no filtro plantado.**

Tanto o pH quanto a alcalinidade aumentaram, indicando a presença de ambiente redutor, como esperado para um WCH. Visto a elevada remoção de  $\text{NH}_4^+$  e o supracitado, infere-se que sua remoção pode estar relacionada principalmente com a adsorção no material filtrante, ou por assimilação das plantas, visto a ausência de ambiente favorável à nitrificação. Vymazal (2005) afirma que as macrófitas são capazes de remover cerca de 10% do total de nitrogênio através da tecnologia de WC. Zhu *et al.* (2011) calcularam a taxa de adsorção cinética de diversos solos visando à aplicação destes em WCs e encontram valores de  $588\text{mgNH}_4^+/\text{kg}_{\text{solo}}$  e  $555\text{mgNH}_4^+/\text{kg}_{\text{solo}}$  para solos do tipo várzea e solos vermelhos, ambos ricos em argila.

Apesar da baixa concentração de  $\text{NO}_3^-$  afluente do WCH, este foi eliminado por completo, por ação combinada da desnitrificação, adsorção no material filtrante e assimilação das macrófitas.

O parâmetro  $\text{PO}_4^{3-}$  apresentou excelente remoção e está relacionado à presença de argila em meio ao material filtrante. A assimilação das plantas geralmente apresenta remoção de fósforo insignificante à parcela total presente nos esgotos (BRIX, 1997). A adsorção é sugerida como mecanismo predominante na remoção de fósforo, o que é passível de saturação. Dessa forma, espera-se que a remoção média de fósforo diminua ao longo da vida útil do sistema (TANNER; SUKIAS; UPSDELL, 1999).

Utilizando a lei estadual 14.765/09 como referência para lançamento do efluente, este se encontra apto para o lançamento por apresentar concentração de fósforo inferior a 4mg/L e remoção superior a 75%.

O mesmo ocorre referente ao parâmetro  $N-NH_4^+$ , previsto na resolução CONAMA 357/05, que estipula valor máximo de lançamento de 20mgN/L. A classificação de acordo com a classe de corpos receptores requer a vazão de saída do sistema e do corpo receptor para estimativa da concentração de mistura.

#### 5.1.3.1. Carga Aplicada

Devido à carência de dados antigos de visitação e, por consequência, a falta de valores de vazões contribuintes ao sistema nos períodos da primeira e da segunda campanha, realizou-se análise de carga aplicada somente para terceira e atual campanha.

Para análise da carga aplicada ao sistema, devido a grande intermitência apresentada, adotou-se três cenários de contribuição de vazão ao sistema:

- O primeiro cenário considera o valor mais recorrente de vazão, igual a 0,15 m<sup>3</sup>/d, e que representa o valor de contribuição mínima ao sistema;
- O segundo cenário considera a média dos valores máximos mensais, igual a 7,5 m<sup>3</sup>/d, para verificação da carga máxima aplicada ao sistema, em média, e
- O terceiro cenário considera a média global de vazão, igual a 1,59 m<sup>3</sup>/d, para caracterização do valor médio teórico de carga aplicada ao sistema.

Para efeito comparativo calculou-se a carga aplicada tanto para a seção transversal ( $A= 7,8 \text{ m}^2$ ) quanto para a seção superficial ( $A= 340 \text{ m}^2$ ) (Tabela 9). Utilizou-se a média de concentração dos valores afluente do WCH da terceira campanha (total de 3 dados,  $n=3$ ) e os valores estimados de vazão de fevereiro a outubro/2014 (total de 273 dados,  $n=273$ ).

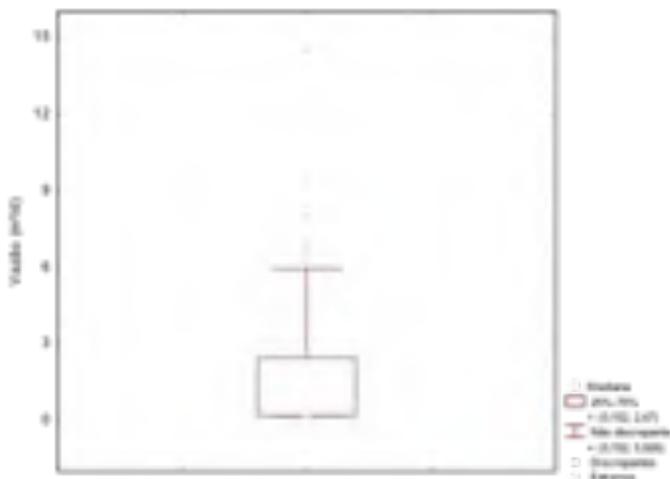
**Tabela 9 - Carga aplicada ao WCH de Agrônômica em 2014.**

	Carga Aplicada g/m <sup>2</sup> .d					
	Mínima		Média		Média Máxima	
	Trans <sup>1</sup> .	Superf. <sup>2</sup> .	Trans.	Superf.	Trans.	Superf.
<b>DQO</b>	17,15	0,39	179,42	4,12	846,31	19,42
<b>SS</b>	1,50	0,03	15,70	0,36	74,04	1,70
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	1,11	0,03	11,57	0,27	54,56	1,25
<b>P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b>	0,74	0,02	7,75	0,18	36,54	0,84

<sup>1</sup>carga aplicada considerando a seção transversal do WCH

<sup>2</sup>carga aplicada considerando a seção superficial do WCH

A Carga média superficial foi a escolhida para comparação com trabalhos terceiros. Para escolha da vazão contribuinte a ser utilizada para comparação com outros sistemas, realizou-se análise estatística da amostra de vazões. Observou-se que até 75% das vazões encontram-se abaixo de 3m<sup>3</sup>/d (Figura 14). Assim, o valor médio de 1,59 m<sup>3</sup>/d torna-se significativo. Na Tabela 10 ilustra-se a comparação entre carga aplicada e remoção de concentração dos parâmetros analisados. A carga utilizada para comparar com trabalhos terceiros foi estimada a partir da vazão média superficial e a concentração média obtida durante a campanha de 2014.



**Figura 14 - Distribuição das vazões estimadas durante o período de fevereiro a outubro de 2014. Realizado utilizando o *software* STATISTICA 7.0.**

**Tabela 10 - Comparativo entre o sistema em estudo e outros WCH.**

Autor	Comparativo Carga Superficial					Comparativo Remoção de Concentração				
	SS	DBO*	N- NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	PT* <sup>1</sup>	SS	DBO*	N- NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	PT*
Sardón <i>et al.</i> (2006)	2	2	2	-	2	2	1	1	-	1
Stewart (2005)	2	1	1	-	1	2	1	2	-	1
Costa <i>et al.</i> (2013)	2	2	2	-	2	2	1	1	-	1
Philippi <i>et al.</i> (2006)	-	-	-	-	-	2	1	1	1	-
Philippi <i>et al.</i> (2006)	-	-	-	-	-	2	1	1	1	-
Philippi <i>et al.</i> (2006)	-	-	-	-	-	2	2	1	1	-
Philippi <i>et al.</i> (2006)	-	-	-	-	-	2	1	1	1	-
Sezerino (1999)	2	2	2	2	-	2	1	1	1	-
Watson (1990)	2	1	1	-	2	2	2	1	-	1
Sezerino (2006)	2	2	2	2	-	2	1	1	1	-
Sezerino (2006)	2	-	2	2	-	2	2	1	1	-

As células com número 2 e em vermelho representam que o sistema em estudo possui parâmetro menor que o do sistema comparado, enquanto que a célula com valor igual a 1 e coloração verde, maior. As células em branco representam a ausência de parâmetro no estudo comparativo. A carga utilizada para comparar com trabalhos terceiros foi estimada a partir da vazão média superficial e a concentração média obtida durante a campanha de 2014.

\* - Por ausência de valores de DQO e PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> nos estudos comparativos, comparou-se com os parâmetros DBO e PT, respectivamente.

<sup>1</sup> - Para conversão de PT para PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, utilizou-se a relação de [PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>] ≈ 0,7[PT] (WPC, 1983).

Como pode ser visualizado o sistema de Agronômica encontra-se superdimensionado em relação aos demais, apresentando, majoritariamente, cargas inferiores e taxas de remoção superiores. Faz-se uma ressalva, porém, ao parâmetro SS, claramente afetado pelo carreamento de argila ou pelo longo tempo de operação do sistema.

Para efeito de ilustração, pode-se analisar o parâmetro DQO que apresenta carga aplicada em relação à área superficial de somente 0,39, 4,12 e 19,42, em maior parte do tempo, em termos médios de vazão e em termos médios máximos de operação, respectivamente.

Maiores detalhes dos sistemas comparados, como área, material filtrante, e percentuais de remoção, encontram-se no item 3.5 - Desempenho de WCH, Tabela 2 - Dados de desempenho de WCH utilizados para o tratamento de águas residuárias domésticas.

#### 5.1.4. Evolução de desempenho do sistema ao longo de 20 anos

A avaliação de desempenho do WCH de Agronômica durante sua operação ao longo de 20 anos se deu através da comparação dos parâmetros comuns às três campanhas realizadas. Na Tabela 11 compila-se os valores de concentração na entrada e na saída do WCH e sua respectiva remoção percentual.

**Tabela 11 – Evolução do desempenho do WCH de Agronômica.**

Parâmetros		Remoção		
		Entrada – Saída (Porcentagem)		
		1994-95	2005-06	Set-Nov/2014
<b>DQO</b>	<b>(mg/L)</b>	695 – 302 (57%)	1699 – 30 (98%)	880 – 109 (88%)
<b>SS</b>	<b>(mg/L)</b>	180 – 74 (59%)	274 – 45 (84%)	77 – 78 (-2%)
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	<b>(mg/L)</b>	- <sup>1</sup>	61,5 – 18,5 (70%)	57,8 – 15,8 (80%)
<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>(mg/L)</b>	6 – 2	3,03 – 1,94	ND
<b>PT (*P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)</b>	<b>(mg/L)</b>	41 – 13 (68%)	*31,4 – 7,4 (76%)	*38 – 0,7 (98%)

1- não há medição.

ND – abaixo do limite de detecção do método.

Observa-se uma evolução de eficiência geral de remoção da primeira campanha para a segunda. A primeira campanha, por ter sido realizada próxima ao início de operação do sistema, apresenta eficiências inferiores.

Esta evolução está explicitada no aumento das taxas de remoção de DQO e SS, principalmente, de 57 a 98% e 59 a 84%, respectivamente. A baixa eficiência no primeiro ano em relação ao parâmetro SS pode estar relacionada à aplicação de uma carga maior em virtude de possíveis atividades presentes então e que hoje não estão mais. Contudo, devido à falta de dados, não pode-se inferir concretamente sobre esta hipótese.

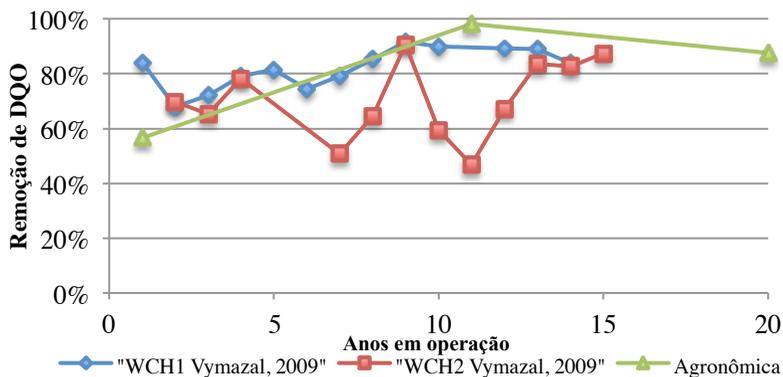
Referente a terceira campanha, verifica-se uma redução da eficiência de DQO e SS, de 98 a 83% e 84 a 26%, respectivamente, em relação a segunda. Acredita-se que a entrada de argila no sistema comprometeu a eficiência de remoção desses dois parâmetros.

Ao mesmo tempo, houve um aumento na remoção de amônia e fósforo. Souza *et al.* (2004) relatam que a remoção de fósforo tende a diminuir ao longo da operação do sistema, devido à inerente saturação do meio filtrante; contudo, isto não foi o ocorrido em Agronômica. O carreamento de argila, muito provavelmente, está relacionado com esta remoção devido a alta capacidade de adsorção das argilas (ZHU *et al.*, 2011), sendo o processo de adsorção o mecanismo com maior percentual de remoção de fósforo em WCs (BRIX, ARIAS e BUBBA, 2001).

Um incremento também pode estar associado devido a recente poda realizada sobre as macrófitas em momentos imediatamente anteriores à visita, resultando numa maior demanda de nutrientes para crescimento vegetal (BRIX, 1997). Em relação à amônia, o aumento de remoção da segunda para a terceira campanha, dada as condições redutoras do ambiente, expressas pelo aumento da alcalinidade, indicam que, devem estar, assim como o fósforo, associadas principalmente com a adsorção no material filtrante e assimilação pelas plantas.

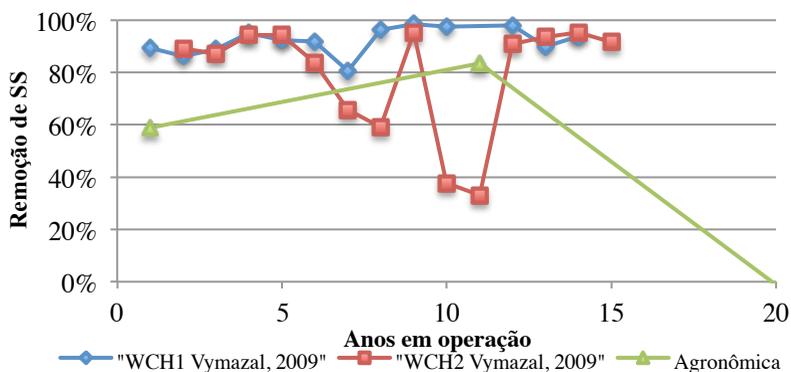
Vymazal (2009) relatou a operação de 15 anos de dois WCH localizados na República Tcheca. Ambos são compostos por brita e plantados com a macrófita *Phragmites australis*. O primeiro WCH1 é composto por um único módulo de 806m<sup>2</sup> e possui contribuição média diária de 56,31m<sup>3</sup>/d; o segundo, WCH2, duas unidades de 2500m<sup>2</sup>, com vazão afluente de 201m<sup>3</sup>/d. As Figuras 15, 16, 17, 18 e 19 comparam as eficiências de remoção de DQO, SS, PT, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> entre o sistema de Agronômica e os dois apresentados por Vymazal (2009).

Referente ao parâmetro DQO, o sistema de Agronômica apresentou *start up* inferior aos sistemas relatados por Vymazal (2009). Contudo, durante sua operação, o sistema de Agronômica atingiu valores superiores de remoção de DQO que os relatos pelo autor, como exposto na Figura 15. Para efeito comparativo, a carga de aplicação no último ano de cada sistema foi de 11,18, 21,03 e 4,12 g/m<sup>2</sup>.d, em WCH1, WCH2 e Agronômica, respectivamente.



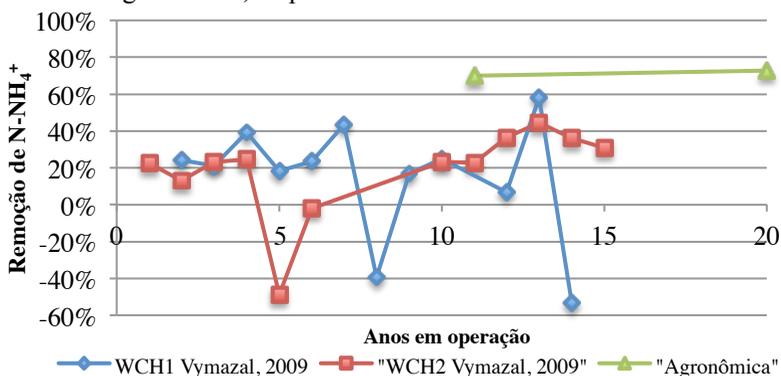
**Figura 15 - Remoção de DQO ao longo da vida operacional de três WCH**

O parâmetro SS é o ponto crítico do sistema de Agronômica. O sistema chegou a apresentar valores satisfatórios de remoção de sólidos suspensos, contudo, atualmente neste quesito, o sistema não demonstra-se eficaz em seu polimento (Figura 16). Para efeito comparativo, a carga de aplicação no último ano de cada sistema foi de 6,99, 7,40 e 0,51 g/m<sup>2</sup>.d, em WCH1, WCH2 e Agronômica, respectivamente.



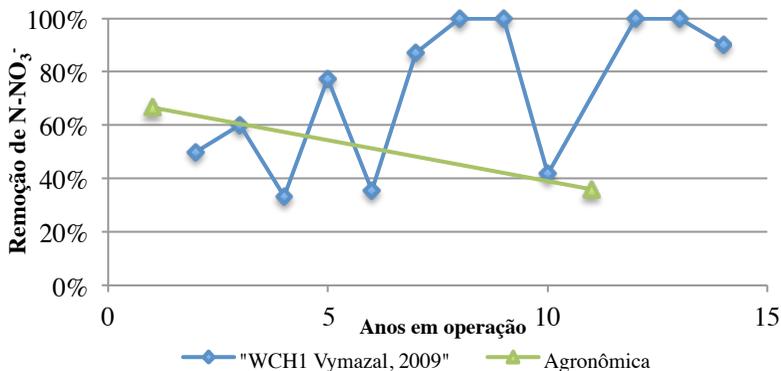
**Figura 16 - Remoção de SS ao longo da vida operacional de três WCH**

A remoção de nitrogênio amoniacal no sistema de Agronômica apresentou-se estável ao longo de sua operação e exibiu valores superiores aos máximos dos outros dois sistemas, caracterizando, assim, uma boa eficiência em termos de remoção deste nutriente. Os sistemas de Vymazal (2009) apresentaram, inclusive, valores negativos de remoção, explicitando-se, assim, a dificuldade de remoção deste nutriente. (Figura 16). Para efeito comparativo, a carga de aplicação no último ano de cada sistema foi de 0,78, 1,87 e 0,27 g/m<sup>2</sup>.d, em WCH1, WCH2 e Agronômica, respectivamente.



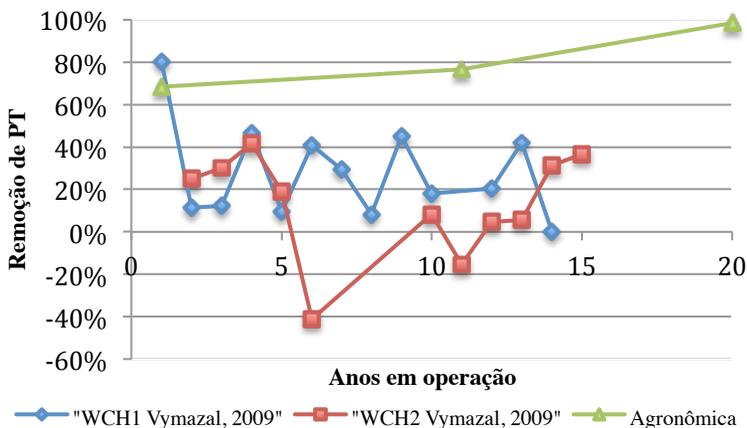
**Figura 17 - Remoção de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ao longo da vida operacional de três WCH**

A variação de nitrato nunca apresentou boas taxas de remoção em Agronômica. No último ano de operação, contudo, a concentração de entrada e saída de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> em Agronômica foi insignificante, estando muito próximo do limite de detecção do método. O WCH2, de Vymazal (2005), não possui dados registrados sobre este parâmetro de qualidade (Figura 18).



**Figura 18 - Remoção de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ao longo da vida operacional de três WCH**

O parâmetro fósforo total apresentou, assim como o nitrogênio amoniacal, excelentes valores de remoção e superiores aos obtidos por Vymazal (2009), exposto na Figura 19. A adequação entre os parâmetros P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> e PT, foi realizada por meio da relação [PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>] ≈ 0,7[PT] (WPC, 1983). Para efeito comparativo, a carga de aplicação no último ano de cada sistema foi de 0,28, 0,21 e 0,01 g/m<sup>2</sup>.d, em WCH1, WCH2 e Agronômica, respectivamente.



**Figura 19 - Remoção de PT<sup>-</sup> ao longo da vida operacional de três WCH**

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho permitiu a avaliação de desempenho de um *Wetland* Construído Horizontal ao longo de 20 anos.

Foi possível observar que o sistema apresentou ao longo de sua vida operacional valores satisfatórios em termos de remoção de matéria orgânica e nutrientes.

O sistema de Agronômica apresentou boas remoções médias de  $\text{NH}_4^+$ , DQO, e  $\text{PO}_4^{3-}$ , na ordem de 79, 81 e 81%, respectivamente, ao longo de toda sua operação.

A remoção de SS global foi próxima de 48%, apresentando uma queda considerável durante o ano de 2014.

O carreamento de argila neste ano pode estar associado com o aumento de remoção de nutrientes, em específico de  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{PO}_4^{3-}$ , para ordem de 90 e 98%, nessa ordem. Esta elevação está provavelmente relacionada com o fenômeno de adsorção causada pelo novo material presente no sistema. Isto acabou por fornecer resultados contrários ao dito na literatura, onde os sistemas apresentam decaimento na remoção de nutrientes ao decorrer de sua operação.

Porém, este mesmo evento acabou por colmatar o sistema, o que se traduziu no surgimento de escoamento superficial ao longo do WCH. Este fato reduziu a eficiência de remoção de sólidos suspensos a nulidade, fazendo com que o sistema permeasse a totalidade de sólidos afluentes a seu efluente.

Ainda assim, o sistema apresentou resiliência e foi capaz de fornecer uma remoção satisfatória de DQO, de 88%. Esta resiliência apresentada demonstra-se como mais um benefício desta tecnologia, favorecendo sua implantação. Cabe ressaltar, todavia, que esta resiliência, em grande parte, deve estar relacionada ao superdimensionamento realizado. Dessa forma, frisa-se ainda mais sua aplicação em ambientes rurais ou de alta disponibilidade de área.

A escassez de dados antigos foi a principal dificuldade enfrentada neste trabalho. Observa-se, assim, que monitoramento contínuo e o correto arquivamento de dados se faz imprescindível para estabelecimento e valorização desta tecnologia, em termos de vida útil de operação e realces operacionais em função da eficiência apresentada pelo sistema.

A tecnologia de *Wetlands* Construídos, apresentou-se como uma opção viável, de baixo custo de implantação e manutenção,

operação simplificada e resiliência a eventos contrários a sua operação, permitindo uma depuração refinada de efluentes domésticos.

## 7. REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1982). NBR 7229. **Construção e Instalação de Fossas Sépticas e disposição dos efluentes finais**. Rio de Janeiro: ABNT 38p.

ANDREOLI, C. V. *et al.* (2009). **Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final**. Rio de Janeiro: ABES / PROSAB 5. 388 p.

APHA – American Public Health Association. (1998). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 19 ed. Washington: APHA-AWWA-WEF.

APHA – American Public Health Association. (2005). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21 ed. Washington: APHA-AWWA-WEF.

BRIX, H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? **Water Science and Technology**, v. 35, n. 5, p.11-17, 1997.

BRIX, H., ARIAS, C.A., BUBBA, M. Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands. **Water Science and Technology**. v. 44, p. 47-54, 2001.

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

COOPER, P.F.; JOB, G. D.; GREEN, M.B.; SHUTES, R.B.E. **Reed Beds an constructed wetlands for wastewater treatment**. Swindon: WRcplc. 1996. 184 p.

COSTA, J. F.; PAOLI, A. C.; SEIDL. M., VON SPERLING, M. Performance and behaviour of planted and unplanted units of a horizontal subsurface flow constructed wetland system treating municipal effluent from a UASB reactor. **Water Science & Technology**. v.68. n.7, p.1495-1502, 2013.

COSTA, Rejane Helena Ribeiro da. **Etude du contrôle du biofilm developpé dans um lit fluidisé triphasique en épuration carboné**

**aérobic.** Tese de Doutorado, Institut National des Sciences Appliquées (INSA). Toulouse, 1989. 256 f.

FONDER, N; HEADLEY, T. The taxonomy of treatment wetlands: A proposed classification and nomenclature system. **Ecological Engineering**.v.51, 2013. p. 203-211, 2013.

HOFFMANN, H.; PLATZER, C. **Technology review of constructed wetlands subsurface. Constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment in developing countries.** Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH (GTZ) saneamento Sustentável – Programa da Ecosan. 2011, 36p.

IWA – International Water Association (2000). **Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation.** Scientific and Technical Report No. 8. London, England: IWA Publishing. 156 p.

KADLEC, R.H. e WALLACE, S. C. (2009). **Treatment Wetlands.** 2 ed. Florida, USA. Taylor & Francis Group, INC. 1000 p.

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, p. 409-435, 1999.

METCALF e EDDY (1991). **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse.** 3 ed. New York, USA: Metcalf & Eddy, Inc. 1334 p.

OLIJNYK, D. P. **Avaliação da nitrificação e desnitrificação de esgoto doméstico empregando filtros plantados com macrófitas (Wetlands) de fluxo vertical e horizontal – sistemas híbridos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PHILIPPI, L. S., *et al.* Vertical flow constructed wetlands for nitrification of anaerobic pond effluent in southern Brazil under different loading rates. In **10<sup>th</sup> International Conference on Wetland System for Water Pollution Control.** Lisboa, Portugal, IWA. 631 – 639, 2006.

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

PHILIPPI, L.S.; COSTA, R. H. R.; SEZERINO, P.H.. (1999). Domestic effluent treatment through integrated system of septic tank and root zone. **Water Science Technology**, n. 3, v. 40, 125-131p.

PHILIPPI, L.S.; SEZERINO, P.H.; OLIJNYK, D.P.; KOSSATZ, B. **Eficácia dos sistemas de tratamento de esgoto doméstico e de água para consumo humano utilizando wetlands considerando períodos diferentes de instalação e diferentes substratos e plantas utilizados.** Florianópolis, SC. EPAGRI. Março, 2007. 49p.

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

SALATI, E. **Utilização de sistemas de wetlands construídas para tratamento de águas.** Relatório técnico para o Programa de Pós Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da EESC. São Carlos, 2000.

SARDÓN, N., SALAS, J.J., PIDRE, J.R., CUENCA, I., 2006. Vertical and horizontal subsurface flow constructed wetlands in the experimental plant of Carrión de los Céspedes (Seville). In: **Proceedings of the 10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control**, MAOTDR 2006, Lisbon, Portugal, pp. 729–739.

SEZERINO, P. H. **Tratamento de esgotos doméstico utilizando o potencial solo-planta através de escoamento sub-superficial de fluxo horizontal.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis, 1999.

SEZERINO,P.H. **Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas (constructed wetlands) no pós- tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical.** 2006. 171f .Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO SOB SANEAMENTO – SNIS (2012). **18º Diagnóstico dos serviços de água e esgoto**. 154 p.

STEWART, E. **Evaluation of septic tank and subsurface flow wetland for Jamaican Public School Wastewater Treatment**. MSc Thesis, Michigan Technological University, 2005.

SOUZA, J. T., HAANDEL, A. V., LIMA, E. P. C., HENRIQUE, I. N. Utilização de wetland construído no pós-tratamento de esgotos domésticos pré-tratados em reator UASB. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 9, p. 285-290, 2004.

TANNER, C.C.; SUKIAS, J.P.S; UPSDELL, M.P. Substratum phosphorus accumulation during maturation of gravel-bed constructed. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 3, p. 147-154, 1999.

TRUU, M.; JUHANSON, J.;e TRUU, J. Microbial biomass, activity and community composition in constructed wetlands. **Science of the Total Environment**, v.407,n.13,p.3958-3971,2009.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. v. 2.Belo Horizonte, MG.Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 1996. 211p

VYMAZAL J. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. **Ecological Engineering**,v. 25, p. 478–90, 2005.

VYMAZAL, J. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. **Ecological Engineering**, v. 35,p. 1-17, 2009.

WATSON, J.T. **Design and performance of the constructed wetland wastewater treatment system at Phillips High School**, Bear Creek, Alabama, Tennessee Valley Authority Technical Report TVA/WR/WQ-90/5, Chattanooga, TN, 1990.

WPC – Water Pollution Control (1983). **Nutrient Control**. Manual of Practice FD-7 Facilities Design. Water Pollution control Federation. 203p.

ZHU, W.L., OUYANG, Y., LONG, C.F., TANG, X.D. Kinetic Adsorption of ammonium nitrogen by substrate materials for constructed wetlands. **Pedosphere**. v. 21. p. 454-463, 2011.

## APÊNDICE A

Tabela 12 - Dados físico-químicos relativos ao mês de setembro/2014.

Parâmetros	Ponto 1 Afluente Média	Ponto 2 Efluente Média	Remoção Ponto 1-2 %
pH	6,2	6,1	-
Alcalinidade (mg/L)	238	217	9%
DQO (mg/L)	943	158	83%
SS (mg/L)	112	83	26%
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	51	10	80%
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	0	0	-
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	0	0,	-
P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	41	2	95%

Tabela 13 - Dados físico-químicos relativos ao mês de outubro/2014.

Parâmetros	Ponto 1 Afluente Média	Ponto 2 Efluente Média	Remoção Ponto 1-2 %
pH	4,93	5,83	-
Alcalinidade (mg/L)	60	150	-
DQO (mg/L)	579	31	88%
SS (mg/L)	56	78	14%
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	71,35	4,23	94%
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	1,70	0,30	-
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	0,20	0,00	-
P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	29,46	0	100%

**Tabela 14 - Dados físico-químicos relativos ao mês de novembro/2014.**

<b>Parâmetros</b>	<b>Ponto 1 Afluente Média</b>	<b>Ponto 2 Efluente Média</b>	<b>Remoção Ponto 1-2 %</b>
<b>pH</b>	6,12	6.56	-
<b>Alcalinidade (mg/L)</b>	112	220	-
<b>DQO (mg/L)</b>	1118,50	138,50	88%
<b>SS (mg/L)</b>	63	88	-40%
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg/L)</b>	47,89	3,01	94%
<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/L)</b>	5,44	0	-
<b>N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (mg/L)</b>	0	0	-
<b>P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (mg/L)</b>	43,55	0	100%