

AVALIAÇÃO DA ADAPTAÇÃO DE MACRÓFITAS EM WETLAND CONSTRUÍDO PARA TRATAMENTO DE LODO, ALIMENTADO COM LODO DE ESGOTO SANITÁRIO DE REATORES EM BATELADAS SEQUENCIAS (RBS), EM ESCALA REAL

Alana Pessutto Lisboa

Florianópolis, 2018



Alana Pessutto Lisboa

**AVALIAÇÃO DA ADAPTAÇÃO DE MACRÓFITAS EM
WETLAND CONSTRUÍDO PARA TRATAMENTO DE LODO,
ALIMENTADO COM LODO DE ESGOTO SANITÁRIO DE
REATORES EM BATELADAS SEQUENCIAIS (RBS), EM
ESCALA REAL**

Trabalho apresentado à Universidade
Federal de Santa Catarina para a
Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Elisa
Magri
Coorientadora: Eng.^a Camila Haiml

Florianópolis, SC
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Lisboa, Alana Pessutto

Avaliação da adaptação de macrófitas em wetland
construído para tratamento de lodo, alimentado com
lodo de esgoto sanitário de reatores em bateladas
sequenciais (RBS), em escala real / Alana Pessutto
Lisboa ; orientador, Maria Elisa Magri,
coorientador, Camila Haiml, 2018.

73 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Wetlands
construídos. 3. Tratamento de lodo. 4. Macrófitas. I.
Magri, Maria Elisa. II. Haiml, Camila. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Alana Pessutto Lisboa

**AVALIAÇÃO DA ADAPTAÇÃO DE MACRÓFITAS EM
WETLAND CONSTRUÍDO PARA TRATAMENTO DE
LODO, ALIMENTADO COM LODO DE ESGOTO
SANITÁRIO DE REATORES EM BATELADAS
SEQUENCIAIS (RBS), EM ESCALA REAL**

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos
requisitos para a Conclusão de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental – TCCII.

Florianópolis, 29 de novembro de 2018.

Banca Examinadora:



Prof.^a Maria Elisa Magri, Dr.^a

Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina



Eng.^a Camila Haiml

Coorientadora



Dr.^a Catiane Pelissari

Universidade Federal de Santa Catarina



Eng.^a Msc. Cristina Moreira Lalau

Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a minha mãe por ter transmitido a mim e ao meu irmão a importância do estudo e conhecimento, e ter sido sempre um exemplo de resiliência perante as adversidades da vida.

Ao Leo, meu companheiro, presente em todos os momentos em minha formação, eu agradeço o apoio, a compreensão e o carinho. E, agradeço, também pela sugestão de qual técnico cursar, antes desta jornada na universidade, pois se não fosse por isso eu não haveria entrado na Engenharia e nem me apaixonado pela área ambiental.

A equipe da Rotária do Brasil, pela oportunidade de desenvolver meu trabalho de conclusão de curso, em especial ao departamento de operações: ao Jaison e aos operadores, pelo apoio prestado, e, principalmente, a Camila, minha coorientadora, sempre deveras solícita e que esteve comigo nas atividades em campo.

Por fim, agradeço a todos os professores do departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, que lecionaram durante os meus anos de graduação na universidade, pelos conhecimentos adquiridos e experiências trocadas. E em especial a professora, Maria Elisa, que realizou a orientação deste trabalho transmitindo-me serenidade e confiança.

Do ponto de vista do planeta não existe jogar lixo
fora: porque não existe “fora”.
(Autor Desconhecido)

RESUMO

O trabalho desenvolvido tem como objetivo a avaliação da adaptação inicial de macrófitas em *wetland* construído para tratamento de lodo (WCL). As espécies de macrófitas monitoradas foram *Typha domingensis*, *Cyperus giganteus*, *Cyperus alternifolius* e *Vetiveria zizanioides* plantadas em WCL alimentado com lodo de esgoto de reatores em bateladas sequenciais, operado em escala real. O WCL integra a estação de tratamento de esgotos sanitários de um loteamento residencial, situado na Grande Florianópolis. O monitoramento, de dois meses, compreendeu o acompanhamento quantitativo e qualitativo das macrófitas, quantificação de taxas de aplicação de lodo e estimativa do balanço hídrico no WCL. As macrófitas das espécies monitoradas obtiveram crescimento quantitativo positivo (com exceção da *Typha*, que não conseguiu se adaptar), com aumentos de altura média superior a 50% para as espécies *Cyperus alternifolius* e *Vetiveria zizanioides*, e de 15% para a espécie *Cyperus giganteus*. Qualitativamente, as espécies *Cyperus alternifolius* e *Cyperus giganteus* apresentaram mudanças, principalmente, quanto ao ressecamento e presença de indivíduos caídos e/ou murchos, em período coincidente com maior volume de lodo aplicado ao WCL. Apesar disso, houve o registro do desenvolvimento das folhas e novos indivíduos nas macrófitas, de todas as espécies, durante o monitoramento. A taxa de aplicação superficial (TAS) de lodo média obtida foi de $24 \text{ kgST.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ e taxa de aplicação hidráulica (TAH) de 21 mm.dia^{-1} . A baixa TAS obtida se relaciona com a concentração de teor de sólidos totais do lodo de alimentação, em média 0,5%, valor abaixo da faixa típica. Quanto ao balanço hídrico, o desaguamento médio do período foi de 78%, de modo que a maior parte do volume total de entrada no WCL retornou como líquido percolado a ETE. Por fim, neste estudo não houve tempo suficiente de monitoramento para comparar o desempenho entre as espécies de macrófitas, porém a adaptação inicial obteve resultados positivos (com exceção da *Typha*), indicando potencial de utilização dessas espécies em WCL.

Palavras-chave: *Wetlands* Construídos. Tratamento de Lodo. Macrófitas.

ABSTRACT

This study aims to the evaluation of the initial adaptation of aquatic macrophytes in sludge treatment constructed wetlands (STW). The monitored species of aquatic macrophytes were *Typha domingensis*, *Cyperus giganteus*, *Cyperus alternifolius* and *Vetiveria zizanioides*, planted in STW and loaded with sewage sludge from sequencing batch reactors, operated in real scale. The STW integrates the wastewater treatment station from a residential area, located near Florianópolis. The monitoring took two months and considered qualitative and quantitative development of aquatic macrophytes, quantification of sludge application rates and estimate of the water balance in the STW. The macrophytes of the species monitored obtained quantitative growth positive (with the exception of *Typha*, which failed to adapt), with increases of average height exceeding 50% for the species *Cyperus alternifolius* and *Vetiveria zizanioides*, and 15% for the species *Cyperus giganteus*. Concerning qualitative development, species *Cyperus alternifolius* and *Cyperus giganteus* presented changes, mainly regarding the dryness and the presence of fallen individuals, in a period coinciding with a higher volume of sludge applied to STW. Nevertheless, the development of leaves and new individuals was recorded in all species os macrophytes in the monitoring period. The average application rate of sludge obtained was $24 \text{ kgTS.m}^{-2}.\text{year}^{-1}$ and hydraulic application rate was 21 mm.day^{-1} . The low application rate of sludge relates to the concentration of dry solids content of loaded sludge, on average 0.5%, a value below the typical range. Regarding the hydric balance, average dewatering of the period was 78%, so that mosto of the total volume of STW entry returned as percolated liquid for the sewage treatment system. Finally, in this study, there was not enough time to compare performance between the species os macrophytes, however the initial adaptation obtained positive results (with the exception of the *Typha*), indicating potential for use of these species in STW.

Keywords: Constructed Wetlands. Sludge Treatment. Aquatic Macrophytes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de <i>wetland</i> construído para tratamento de lodo.....	38
Figura 2 - Fluxograma simplificado do sistema de tratamento da ETE.	44
Figura 3 - Plantio de mudas: a) Uso de pá para abrir espaço para a muda; b) Colocação da muda.....	45
Figura 4 – Macrófita nº 9 da espécie <i>Typha</i> em: a) 02/08/2018 e b) 28/08/2018.....	51
Figura 5 - Gráfico da Altura Média com Desvio Padrão da espécie <i>Cyperus giganteus</i> durante o período de monitoramento.	53
Figura 6 - Gráfico da Taxa de Crescimento Média com Desvio Padrão da espécie <i>Cyperus giganteus</i> durante o período de monitoramento.	54
Figura 7 - Número Médio de Indivíduos com Desvio Padrão da espécie <i>Cyperus giganteus</i> durante o período de monitoramento.	55
Figura 8 – Macrófita nº 2 da espécie <i>Cyperus giganteus</i> em: a) 02/08/18; b) 28/08/18.....	56
Figura 9 - Macrófita nº 2 da espécie <i>Cyperus giganteus</i> em: 21/09/18.....	57
Figura 10 - Macrófita nº 2 da espécie <i>Cyperus giganteus</i> em: 09/10/18.....	58
Figura 11 - Gráfico da Altura Média com Desvio Padrão da espécie <i>Cyperus alternifolius</i> durante o período de monitoramento.	59
Figura 12 - Gráfico da Taxa de Crescimento Média com Desvio Padrão da espécie <i>Cyperus alternifolius</i> durante o período de monitoramento.	60
Figura 13 – Macrófita nº 1 da espécie <i>Cyperus alternifolius</i> em: 02/08/18.....	61
Figura 14 - Macrófita nº 1 da espécie <i>Cyperus alternifolius</i> em: a) 28/08/18 e b) 21/09/18.	61
Figura 15 – Macrófita nº 1 da espécie <i>Cyperus alternifolius</i> em: 09/10/18.....	62
Figura 16 - Gráfico da Altura Média com Desvio Padrão da espécie <i>Vetiveria zizanioides</i> durante o período de monitoramento.....	63
Figura 17 - Gráfico de Taxa de Crescimento Média com Desvio Padrão da espécie <i>Vetiveria zizanioides</i> durante o período de monitoramento.	64
Figura 18 – Macrófita nº 1 da espécie <i>Vetiveria zizanioides</i> em: a) 02/08/18; b) 28/08/18.....	65

Figura 19 – Macrófita nº 1 da espécie <i>Vetiveria zizanioides</i> em: 21/09/18.	66
Figura 20 - Volume Acumulado e Volume Médio de Lodo em cada semana de aplicação, durante o período de monitoramento.	67
Figura 21 - Gráfico da Precipitação Pluviométrica Acumulada nos meses de monitoramento.	70
Figura 22 - Gráfico da Precipitação Pluviométrica Diária do Mês de Setembro.	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e Desvantagens da Centrífuga.	34
Quadro 2 - Vantagens e Desvantagens da Prensa Desaguadora.	34
Quadro 3 - Vantagens e Desvantagens do Leito de Secagem.....	35
Quadro 4 - Taxa de aplicação superficial em WCL, quantidade e área superficial de cada um, referente ao estudo de alguns autores.	37
Quadro 5 - Resumo dos parâmetros analisados de acordo com cada espécie de macrófita em estudo.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vazão Média Diária e Volume Acumulado e Médio Mensal de lodo aplicado durante o período de monitoramento.....	67
Tabela 2 – Concentração Média de Sólidos Totais no Lodo de Alimentação.	68
Tabela 3 - Resultado da Taxa de Aplicação Superficial de Lodo e Taxa de Aplicação Hidráulica médias do período de monitoramento...	69
Tabela 4 - Volume Médio de Precipitação Pluvial no período do monitoramento.	71
Tabela 5 - Balanço Hídrico Médio Mensal do WCL.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
RBS – Reator em Bateladas Sequenciais
SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
ST – Sólidos Totais
SV – Sólidos Voláteis
TAH – Taxa de Aplicação Hidráulica
TAS – Taxa de Aplicação Superficial
WCL – *Wetland* Construído para Tratamento de Lodo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	OBJETIVOS	26
1.1.1	Objetivo geral	26
1.1.2	Objetivos específicos	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	LODO DE ESGOTO	29
2.1.1	Características do Lodo de Esgoto	30
2.2	MÉTODOS DE TRATAMENTOS DE LODO	32
2.2.1	Desidratação de Lodo	33
2.2.1.1	Centrífuga.....	33
2.2.1.2	Prensa Desaguadora	34
2.2.1.3	Leitos de Secagem	35
2.2.1.4	<i>Wetlands</i> Construídos para Tratamento de Lodo	36
2.2.1.4.1	<i>Aspectos Gerais do Sistema e Operação</i>	37
2.2.1.4.2	<i>Macrófitas</i>	39
3	METODOLOGIA	43
3.1	LOCAL DO ESTUDO	43
3.1.1	Estação de Tratamento de Esgoto	43
3.1.2	Descrição do <i>Wetland</i> para Tratamento de Lodo	44
3.2	PLANTIO DAS MACRÓFITAS	44
3.3	MONITORAMENTO	45
3.3.1	Desenvolvimento das Macrófitas	46
3.3.1.1	Altura e Taxa de Crescimento.....	46
3.3.1.2	Número de Indivíduos.....	47
3.3.1.3	Análise Qualitativa.....	47
3.3.2	Alimentação do <i>Wetland</i> para Tratamento de Lodo	47
3.3.2.1	Taxa de Aplicação Superficial e Taxa de Aplicação Hidráulica 48	
3.4	BALANÇO HÍDRICO.....	48

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
4.1	DESENVOLVIMENTO DAS MACRÓFITAS	51
4.1.1	<i>Typha domingensis</i>	51
4.1.2	<i>Cyperus giganteus</i>	52
4.1.3	<i>Cyperus alternifolius</i>	58
4.1.4	<i>Vetiveria zizanioides</i>	62
4.2	ALIMENTAÇÃO DO <i>WETLAND</i> PARA TRATAMENTO DE LODO	66
4.2.1	Vazão Diária e Volume Aplicado.....	66
4.2.2	Concentração de Sólidos Totais e Taxas de Aplicação	68
4.3	BALANÇO HÍDRICO	69
4.3.1	Dados de Precipitação Pluviométrica.....	69
4.3.2	Volume de Saída do Líquido Percolado.....	71
4.3.3	Balanço Hídrico.....	72
5	CONCLUSÃO.....	75
	REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

O tratamento de esgoto sanitário é atividade necessária no meio urbano e rural para a promoção da saúde da população e meio ambiente. Aliado a isso, o crescimento populacional e o aumento das exigências ambientais, impulsionam investimentos do poder público e privado em obras de saneamento para maior atendimento da população, contribuindo para a ampliação do número de estações de tratamento. Porém, diretamente associado ao aumento de esgoto coletado e tratado tem-se uma maior geração de um subproduto desse tratamento: o lodo de esgoto.

O lodo de esgoto terá composição característica conforme a qualidade do afluente dos sistemas de tratamento de esgoto, dos tipos de processos e grau de tratamentos empregados. Dentre a composição do lodo gerado pode haver constituintes orgânicos e minerais que podem ter características de fertilizantes, algo positivo caso pretenda-se o reuso do biossólido. Porém, pode haver também constituintes indesejáveis como metais, organismos patogênicos e contaminantes orgânicos persistentes, que representam riscos sanitários e ambientais (TSUTIYA, 2002; SILVA *et al.*, 2007).

A necessidade de tratamento do lodo decorre de diversos fatores, dentre os quais a quantidade de água presente, em torno de 98% da composição. Isso porque ao se reduzir o volume também há redução do custo com transporte e a disposição final, que no Brasil, predominantemente, é efetuada em aterros sanitários (VAN HAANDEL; ALEM SOBRINHO, 2006; VON SPERLING; GONÇALVES, 2007).

Outro fator relevante é decorrente da presença de microorganismos patogênicos, como bactérias, vírus, cistos de protozoários e ovos de parasitas intestinais (helminthos). A presença de patógenos no lodo representa risco de saúde pública, pela possibilidade de contaminação e proliferação de doenças em humanos e animais (VAN HAANDEL; ALEM SOBRINHO, 2006).

As tecnologias para tratamento mais empregadas envolvem os processos mecanizados, com uso de equipamentos cujas principais funções são adensamento e desaguamento do lodo; ou os processos naturais, geralmente, leitos de secagem (GONÇALVES *et al.*, 2001; PEDROZA *et al.*, 2006).

Um aspecto positivo de alguns sistemas naturais é a possibilidade de reciclo do lodo. Isso pode ser viável ao adotar-se o sistema de *wetlands* construídos para tratamento de lodo, o qual consiste em uma tecnologia que se baseia em processos naturais, sendo pouco aplicada no

Brasil, porém largamente empregada em vários países da Europa (UGGETTI *et al.*, 2010).

Essa tecnologia de tratamento além de promover a desidratação, por meio da percolação e exposição à radiação solar, também propicia a mineralização do lodo. Tanto no processo de desidratação quanto na mineralização um componente desse sistema é essencial, as macrófitas (ou plantas aquáticas). Pois, através de seus movimentos promove a formação de sulcos na camada seca superficial de lodo, de modo que a evaporação de água e transferência de oxigênio para as camadas inferiores é facilitada. E, além disso, a entrada de oxigênio nessas camadas também intensifica a atividade microbológica aeróbica em todas as partes do sistema, intensificando a mineralização do lodo (NIELSEN, 2003).

Diante da importância das macrófitas em *wetlands* construídos para tratamento de lodo, percebe-se que não existem muitos estudos relacionados ao tema na literatura, e, também, que as pesquisas e experiências existentes geralmente utilizam-se das mesmas espécies.

Assim, o presente trabalho consiste no monitoramento, durante os meses de agosto a novembro de 2018, de macrófitas plantadas em um *wetland* construído para tratamento de lodo em uma Estação de Tratamento de Esgotos de um loteamento residencial, situado na região metropolitana da Grande Florianópolis. O objetivo foi avaliar a adaptação inicial das macrófitas estudadas como tipos de espécies potenciais para uso em sistemas de *wetland* construído para tratamento de lodo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a adaptação de diferentes espécies de macrófitas em um *wetland* construído para tratamento de lodo, alimentado com lodo de esgoto sanitário de reatores em bateladas sequenciais (RBS), operando em escala real.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Acompanhar o desenvolvimento quantitativo e qualitativo das espécies de macrófitas plantadas;

- b) Determinar a taxa de aplicação superficial e a taxa hidráulica aplicada de lodo de esgoto;
- c) Estimar o balanço hídrico do *wetland* construído para tratamento de lodo, com o uso de dados de precipitação pluviométrica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LODO DE ESGOTO

No Brasil, o esgoto sanitário é composto das águas residuais, águas utilizadas em atividades domésticas, que são lançadas em redes de esgotamento sanitário, e as águas de infiltração do subsolo que penetram nas tubulações, ambas são integradas e conduzidas às estações de tratamento de esgoto (ETE).

De acordo com von Sperling (1996) a composição do esgoto sanitário é 99,9% de água, sendo 0,1% restante a fração que inclui sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, e, também, microorganismos. Esta fração de 0,1% corresponde às características do esgoto sanitário, em termos de qualidade física, química e biológica. Ao final do tratamento, estas características devem estar em conformidade com os padrões legais para o destino final dos efluentes tratados.

O tratamento de esgoto é uma atividade na qual são empregados processos e unidades, com utilização de equipamentos e produtos químicos, e nas etapas de tratamento resíduos são gerados. Segundo Alem Sobrinho (2002) todo sistema de tratamento produz resíduos sólidos. Esses são gerados na remoção de sólidos sedimentáveis do efluente, na remoção de sólidos em suspensão com o uso de produtos químicos e, também, no processo de tratamento biológico, onde a matéria orgânica biodegradável se transforma em sólidos suspensos voláteis. Assim, o conjunto de sólidos quando agregado e separado do efluente é denominado de lodo, e como um resíduo sólido necessita de tratamento e disposição final adequada.

De acordo com van Haandel e Alem Sobrinho (2006) o lodo gerado em ETES pode apresentar três aspectos indesejáveis. O primeiro é a instabilidade biológica, se a presença de material biodegradável for alta o lodo pode se tornar putrescível, e há liberação de odores. O segundo é referente à qualidade sanitária, que é ruim, devido à presença de microorganismos, como vírus, bactérias e parasitas (protozoários, ovos de nematóides e helmintos) que representam riscos à saúde da população. E, o último aspecto, é que a concentração de sólidos suspensos é baixa, em média entre 5 a 50 g.L⁻¹, de forma que o volume de lodo produzido é elevado.

Devido aos aspectos do lodo citados devem ser aplicados processos de tratamento ao lodo. O condicionamento e o desaguamento são aplicados para redução do teor de água, e por consequência, o volume de lodo, de modo a facilitar o manuseio e reduzir custos com

transporte até a disposição final. A estabilização e higienização são importantes, sobretudo de acordo com a disposição final que será efetuada, sendo realizada para tornar o material sólido estável e que não represente riscos a saúde humana (MIKI; ANDRIGUETI; ALEM SOBRINHO, 2002; VAN HAANDEL; ALEM SOBRINHO, 2006).

Após o lodo de esgoto passar pelos processos de tratamento, de forma a estar higienizado, estável e seco, passa a ser denominado de biossólido (MELO; MARQUES; MELO, 2002).

Miki, Andrigueti e Alem Sobrinho (2002) definem biossólidos como “os produtos orgânicos gerados nos processos de tratamento de esgotos primários e secundários que podem ser reutilizados de modo benéfico, após tratamento adequado”.

O tratamento de lodo tem sido mais estudado e implantado, principalmente, devido ao aumento do número de ETEs instaladas e a necessidade de atender as exigências de legislações e órgãos ambientais (VAN HAANDEL; ALEM SOBRINHO, 2006).

Com a implantação de novas ETEs o volume de esgotos tratados aumenta como pode ser observado pelos dados informados pelo Sistema Nacional de Informações para o Saneamento (SNIS), onde de 2015 para 2016 houve o aumento de 250.000.000 m³ de esgotos tratados (BRASIL, 2018). Dessa forma, também se aumenta o volume de lodo de esgoto a ser tratado, o que representa desafios para o país, visto que o tratamento e a disposição final do lodo são muitas vezes negligenciados na implantação e operação de ETEs.

2.1.1 Características do Lodo de Esgoto

As características do lodo dependem da qualidade do afluente dos sistemas de tratamento de esgoto, dos tipos de processos e grau de tratamentos empregados, bem como do tipo de lodo (primário, secundário) (TSUTIYA, 2002).

O lodo primário é o lodo gerado em processos de tratamento primário, geralmente, de natureza físico-química, e o lodo secundário é o lodo gerado em processos de tratamento secundário, que são, normalmente, de natureza biológica (TSUTIYA, 2002).

A composição e produção do lodo secundário gerado variam, também, de acordo com o tipo de tratamento biológico adotado, ou seja, se por via aeróbia ou anaeróbia. Em geral, o lodo gerado é constituído por bactérias vivas, pois estes microorganismos são os agentes atuantes no processo biológico, sendo então o próprio lodo matéria-prima para ocorrência dos processos. Quando e como o lodo deixa de ser matéria-

prima e passa a ser resíduo depende da tecnologia e operação empregada no tratamento de esgoto (FERNANDES; SOUZA, 2001).

Em processos biológicos aeróbios como sistemas de lodo ativado convencional o tempo de detenção de sólidos, ou seja, a idade do lodo é baixa, em média de 4 a 10 dias, de modo que as bactérias atuantes consomem a matéria orgânica via catabolismo oxidativo, sem ter degradação suficiente de matéria celular das próprias bactérias (anabolismo). Devido a isso, o lodo que é retirado ainda possui elevada quantidade de lodo ativo e, portanto, necessita passar por processo de estabilização (VON SPERLING, 1996; VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001).

A variante destes sistemas, lodos ativados com aeração prolongada, no entanto, gera lodo estabilizado, pois possui uma idade do lodo maior, em torno de 20 a 30 dias. Apesar da diferença quanto ao fluxo, que é intermitente e não contínuo como os dois sistemas anteriores, em sistemas de lodo ativado em bateladas sequenciais ocorre processos similares ao de aeração prolongada só que em um único reator, dessa forma, também geram lodos estabilizados (VON SPERLING, 1996; VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001).

Após o processo de tratamento de esgotos algumas substâncias e compostos presentes no efluente podem ter o aumento de sua concentração, detectada no lodo. Dentre a composição do lodo gerado pode haver constituintes orgânicos e minerais que possam ter características fertilizantes, algo positivo caso pretenda-se o reuso do biossólido. Porém, pode haver também constituintes indesejáveis como metais, organismos patogênicos e contaminantes orgânicos persistentes, que representam riscos sanitários e ambientais (SILVA *et al.*, 2007).

A presença de metais e substâncias químicas no lodo depende do efluente tratado e do grau de tratamento empregado na ETE, de modo que o lodo pode apresentar diferentes composições quanto às substâncias e compostos considerados como poluentes.

As concentrações de metais pesados no lodo são maiores quando há efluente industrial na composição do efluente tratado na ETE, entre os quais, por exemplo, o chumbo e o cádmio (BETTIOL; CAMARGO, 2006).

Com o uso de coagulantes químicos no processo de tratamento de efluentes domésticos, metais como o ferro e alumínio podem apresentar elevadas concentrações no lodo.

Quanto à presença de compostos orgânicos persistentes, semelhante aos metais pesados, ocorre, principalmente, pela composição dos efluentes industriais, provenientes de indústrias químicas, fabricação

de pesticidas, indústrias farmacêuticas, entre outros (SILVA *et al.*, 2007).

No que se refere aos microorganismos patogênicos presentes no lodo de esgoto os principais são bactérias, vírus, cistos de protozoários e ovos de parasitas intestinais (helmintos). Esses microorganismos, no processo de tratamento de esgoto, são em parte adsorvidos nas partículas sólidas e tendem a precipitar durante a decantação, de modo que se concentram no lodo de esgoto. A quantidade de patógenos no lodo depende das características da população e do tipo de tratamento do lodo (TSUTIYA, 2002).

A presença de patógenos no lodo representa risco de saúde pública, pela possibilidade de contaminação e proliferação de doenças em humanos e animais.

De forma a reduzir ou inativar os organismos patogênicos processos de estabilização e higienização podem ser aplicados ao lodo. Os métodos e tipos desses processos que devem ser adotados dependem das características do lodo e da disposição final que se pretende aplicar.

2.2 MÉTODOS DE TRATAMENTOS DE LODOS

As características do lodo, bem como a disposição final pretendida determinam as metodologias mais adequadas para o seu tratamento. O teor de umidade é uma das principais características que influenciam diretamente quais os métodos e tecnologias serão adotadas. O teor de umidade pode ser definido, em porcentagem, por 100 menos o teor de sólidos secos. Segundo Von Sperling e Gonçalves (2007), o lodo contém teor de 2% de sólidos secos, e, portanto, 98% de água.

Como a maior parte do lodo é composta por água destaca-se a importância da escolha adequada do método de tratamento de lodo, o qual terá como um dos principais objetivos a desidratação, pois com a redução de volume os custos com transporte e disposição final tendem a ser menores.

Porém, antes da desidratação, se o lodo gerado na ETE não estiver estabilizado, ou seja, com sua matéria orgânica biodegradada de forma a apresentar odores menos ofensivos e menores concentrações de microorganismos patogênicos, deverá sofrer processo de estabilização (FERNANDES; SOUZA, 2001). A estabilização pode ser efetuada por processos biológicos, químicos ou térmicos (LUDUVICE, 2007).

Os processos de estabilização podem reduzir os níveis de patogenicidade do lodo, através de digestão aeróbia ou anaeróbia (processos biológicos). Contudo, parasitas intestinais e, principalmente,

os ovos de helmintos, são persistentes e requerem tratamentos complementares a estabilização para parcial ou completa inativação (PINTO, 2007). Para tanto, processos de higienização são empregados ao tratamento de lodo, sendo essenciais quando existir manipulação do lodo e o reuso para fins agrícolas ou aplicações em solo.

Os métodos de desidratação mais utilizados são o desaguamento mecânico e os processos naturais de secagem. Os processos mecânicos envolvem equipamentos, com consumo de energia, e necessitam de uma etapa anterior de condicionamento do lodo, com o uso de coagulantes (GONÇALVES *et al.*, 2001). Os processos naturais utilizam-se dos mecanismos naturais de evaporação, pela exposição solar, e percolação por meio poroso (PEDROZA *et al.*, 2006).

Alguns dos métodos mais utilizados para desidratação do lodo, no Brasil, são apresentados a seguir. Assim como, é descrita a tecnologia de *wetland* construído para tratamento de lodo (WCL) que compreende o objeto de estudo deste trabalho.

2.2.1 Desidratação de Lodo

O tipo de lodo e a área disponível para a implantação da tecnologia de desidratação são condicionantes para a seleção do tipo de processo. Em geral, quando se há disponibilidade de área, se opta por processos naturais, sendo mais comum a adoção de leitos de secagem. No entanto, quando se trata de ETES localizadas em áreas mais urbanizadas, principalmente, ETES de médio e grande porte, processos mecânicos, como centrífugas, filtro prensa e prensa desaguadora, são escolhidos (GONÇALVES *et al.*, 2001).

2.2.1.1 Centrífuga

As centrífugas são equipamentos empregados tanto para adensamento quanto para desidratação do lodo. Utilizam-se do processo de centrifugação, na qual a força centrífuga aplicada promove a separação da fração sólida da líquida. As centrífugas são equipamentos compactos, exigindo cerca de 40 m² de área. Atualmente, o modelo mais empregado é o tipo *decanter*, o qual possui um decantador cônico horizontal (tambor) e a rosca transportadora (GONÇALVES *et al.*, 2001; GONÇALVES; LUDUVICE; VON SPERLING, 2007).

De acordo com Gonçalves *et al.* (2001), o desempenho da centrífuga na remoção de umidade está relacionado com a concentração de sólidos voláteis no lodo. Assim, quanto maior for o grau de

estabilização do lodo melhor será a eficiência de remoção e o teor de sólidos da torta de lodo. Os autores relatam para lodo aeróbio proveniente de aeração prolongada, concentração de sólidos totais da torta de lodo entre 18 a 22%, com captura de 95% de sólidos, com o uso de polieletrólitos (condicionamento de lodo).

O Quadro 1 apresenta as principais vantagens e desvantagens do uso desse equipamento para desidratação de lodo.

Quadro 1 - Vantagens e Desvantagens da Centrífuga.

Vantagens	Desvantagens
Requerem pouca área, mesmo para equipamentos de grande porte	Alto consumo de energia elétrica
Não emitem aerossol	Alto custo de manutenção
Não emitem ruído excessivo	Operação e manutenção por profissionais especializados

Fonte: Gonçalves; Ludovice; Von Sperling (2007).

2.2.1.2 Prensa Desaguadora

As prensas desaguadoras desidratam lodo por ação da gravidade e por compressão. Inicialmente, a água presente no lodo é removida por gravidade através de peneiramento, após é comprimida entre telas em uma zona de baixa pressão. E, a última etapa, consiste em compressão por roletes de diferentes diâmetros em zona de alta pressão. Ao final do processo, o lodo é removido por raspadores e as telas são lavadas com jatos de água a alta pressão (GONÇALVES *et al.*, 2001).

Conforme apresentam Gonçalves, Ludovice e Von Sperling (2007), para lodos ativados podem ser obtido teores de concentração de sólidos totais da torta de lodo entre 14 a 18%, com captura de sólidos entre 90 a 95%.

O Quadro 2 apresenta as principais vantagens e desvantagens obtidas ao empregar a prensa desaguadora para desidratação de lodo.

Quadro 2 - Vantagens e Desvantagens da Prensa Desaguadora.

Vantagens	Desvantagens
Baixo custo de aquisição	Emissão de aerossol e possível emissão de odores
Consumo reduzido de energia elétrica	Ruído excessivo
	Manutenção periódica (alto número de rolamentos)

Fonte: Gonçalves; Ludovice; Von Sperling (2007).

2.2.1.3 Leitos de Secagem

Os leitos de secagem consistem, normalmente, em tanques retangulares de concreto que funcionam como filtros granulares de lodo. As descargas de lodo são periódicas e não há adição de coagulantes ou polieletrólitos. A remoção de água ocorre através de dois processos naturais: a percolação e a evaporação (PEDROZA *et al.*, 2006; GONÇALVES; LUDUVICE; VON SPERLING, 2007).

Segundo Pedroza *et al.* (2006), a percolação é o processo que mais reduz o teor de umidade do lodo, atingindo aproximadamente 80% de umidade. Para alcançar menores teores de umidade é necessária a ocorrência da evaporação superficial. A eficiência da evaporação pode ser aumentada ao se utilizar técnicas que impeçam a influência negativa de chuvas e aproveite a energia solar, como o cobrimento do leito com material transparente, por exemplo.

Van Haandel e Lettinga (1994, apud Gonçalves; Luduvice; Von Sperling, 2007), observam que devido à exposição solar na camada de lodo superficial, o processo de desidratação em leito de secagem pode remover consideravelmente a quantidade de organismos patogênicos.

O material desidratado no leito de secagem deve ser removido quanto à concentração de sólidos totais por cerca de 30%. Não retirar este lodo seco pode propiciar o crescimento de vegetação o que implica em má operação do leito de secagem e dificulta a retirada do lodo (GONÇALVES; LUDUVICE; VON SPERLING, 2007).

O Quadro 3 apresenta as principais vantagens e desvantagens da aplicação de leitos de secagem para desidratação de lodo.

Quadro 3 - Vantagens e Desvantagens do Leito de Secagem.

Vantagens	Desvantagens
Baixo custo de implantação	Área requerida
Simplicidade operacional e baixo nível de atenção requerida	Retirada de lodo lenta, manual
Baixo consumo de energia elétrica	Exigência de estabilização prévia do lodo
Torta com alto teor de sólidos	Risco de liberação de odores desagradáveis e proliferação de moscas
	Risco de contaminação do lençol freático

Fonte: Adaptado de Gonçalves *et al.* (2001).

2.2.1.4 *Wetlands* Construídos para Tratamento de Lodo

Wetlands são ecossistemas alagados, na maior parte do tempo, e que ocorrem naturalmente no ambiente. Os *wetlands* construídos são sistemas de engenharia projetados para reproduzir os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem naturalmente no meio ambiente, utilizados tanto em meio urbano como rural. Esses sistemas, além de serem uma alternativa de tratamento sustentável, necessitam de baixa operação e manutenção com boa eficiência de tratamento (DOTRO *et al.*, 2017).

Como tecnologia aplicada ao saneamento, *wetlands* construídos são empregados com diversas finalidades, entre as quais o tratamento de águas residuais, aplicação mais utilizada no Brasil, mas também são aplicados para o tratamento do lodo de esgoto, gerado em estações de tratamento de efluentes domésticos ou industriais. Os WCL têm sido implantados com a finalidade principal de desidratar e mineralizar o lodo.

Quando comparados com tecnologias de desidratação mecânica os WCL necessitam de menor consumo de energia, menor custo de manutenção e, também, não necessitam de remoção periódica do lodo acumulado. Entretanto, não há parâmetros de projeto e operação para esta tecnologia, o que existe são experiências de longo prazo (>20 anos) (DOTRO *et al.*, 2017).

Segundo Uggetti *et al.* (2010) na Europa esse sistema tem sido utilizado desde o final da década de 1980, em diversos países como Dinamarca, Polônia, Reino Unido, Espanha, França, entre outros. Uggetti *et al.* (2009) ressalta que esta tecnologia é menos comum em regiões do Mediterrâneo, incluindo a Espanha, do que no norte da Europa, apesar de apresentar condições climáticas mais favoráveis para esse tipo de sistema.

As experiências do Brasil, de tratamento de lodo com WCL, consistem em pesquisas experimentais com sistemas piloto e sistemas em escala real implantados por empresas privadas (SUNTTI, 2010; KÄFER, 2015).

Nos WCL são aplicadas técnicas de construção similares aos leitos de secagem, cujo objetivo principal é a desidratação. Porém, nos WCL, além da desidratação ocorrida através da evapotranspiração e percolação, ocorre processo de mineralização do lodo, transformado em terra fértil ao final do tratamento (HOFFMANN *et al.*, 2004).

O produto final do tratamento do lodo, se dentro de limites legais para determinadas substâncias, bem como microorganismos

patogênicos, pode ser aproveitada em aplicações no solo e/ou agricultura devido à quantidade de nutrientes presentes.

No Brasil, a Resolução n° 375/2006, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em ETEs (BRASIL, 2006).

2.2.1.4.1 Aspectos Gerais do Sistema e Operação

O lodo tratado em WCL pode ser proveniente de diferentes sistemas de tratamento de esgoto, como reatores anaeróbicos, sistemas de lodo ativado convencional ou com aeração prolongada, tanques sépticos. O sistema pode estar instalado na própria planta da ETE, como uma unidade integrante desta, ou também ser projetado como unidade de gerenciamento de lodo de uma região, recebendo lodo de esgoto coletado de unidades de tratamento individual por caminhões autovácuo.

De modo geral, os WCL que vem sendo implantados nos últimos anos utilizam como base para o dimensionamento a taxa de aplicação superficial (TAS), que é definida como a concentração de sólidos totais aplicado no sistema por unidade de área e tempo (SUNTTI, 2010).

Ainda, segundo Nielsen (2003), WCL tem o dimensionamento com base na produção de lodo (em toneladas de sólidos totais por ano), época da produção de lodo, características do lodo, condições climáticas. O autor ressalta que caso sejam aplicadas taxas muito altas há a possibilidade de reduzida desidratação, pouco ou insuficiente crescimento das macrófitas aquáticas, e menor período de operação (<10 anos).

O Quadro 4 relaciona diferentes TAS adotadas por alguns autores, bem como a área superficial de cada WCL, todos referentes a lodo proveniente de sistema de tratamento do tipo lodo ativado.

Quadro 4 - Taxa de aplicação superficial em WCL, quantidade e área superficial de cada um, referente ao estudo de alguns autores.

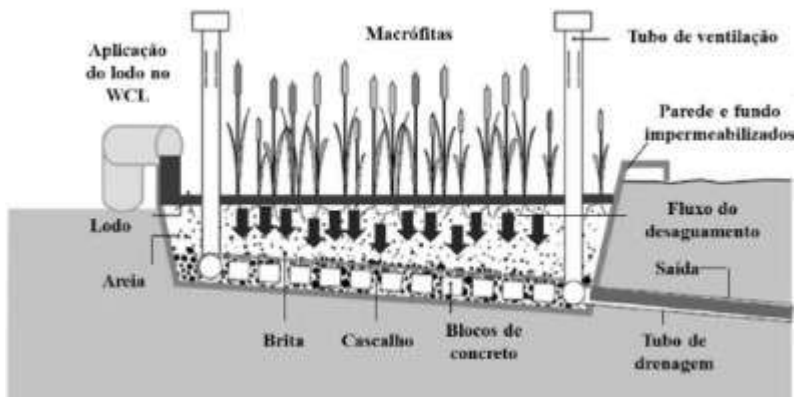
TAS média (kg ST.m ⁻² .ano ⁻¹)	N° de WCL	Superfície de cada WCL (m ²)	Referência
60	10	1050	Nielsen (2007)
55 e 125	3 e 7	66 e 25	Uggetti (2009)
30 e 75	2	0,53	Stefanakis <i>et al.</i> (2009, apud Käfer, 2015)
60	8	400	Olsson <i>et al.</i> (2014)

De modo geral, o lodo gerado na estação de tratamento de esgoto (ETE) é encaminhado a um tanque de equalização, onde é homogeneizado, e após é aplicado na superfície em cada leito, em que cada leito corresponde a um WCL (UGGETTI *et al.*, 2010). Não há um padrão para o número de leitos, variando, principalmente, conforme a taxa de aplicação do lodo no sistema e a área disponível para implantação.

A base dos leitos pode ser construída de concreto ou solo natural, deve ser impermeabilizada com geomembrana para evitar infiltração do percolado, e, conseqüentemente, possíveis contaminações do solo e lençol freático. No fundo dos leitos são instaladas tubulações perfuradas para escoamento do percolado, que é a parte líquida do lodo de esgoto que percola pelo meio filtrante (brita e areia) do WCL. O percolado coletado, no sistema de drenagem, retorna ao tratamento da ETE. A descarga do lodo é efetuada em alternância entre os leitos, de forma a permitir períodos de alimentação e de repouso em cada leito (UGGETTI *et al.*, 2010).

Na Figura 1 tem-se um esquema do WCL identificando as camadas que usualmente compõem o sistema.

Figura 1 - Esquema de *wetland* construído para tratamento de lodo.



Fonte: Käfer (2015).

O meio filtrante é construído com diferentes camadas, em geral com camadas de areia e brita, podendo haver também camada de pedregulhos na parte inferior. Uggetti *et al.* (2010) cita valores de altura média entre 30-60 cm para o meio filtrante, sendo composto por camadas de 15-20 cm de pedregulhos, 20-30 cm de brita e 10-15 cm de areia, de baixo para cima, respectivamente. As plantas utilizadas no

sistema de tratamento são as macrófitas aquáticas, sendo a *Phragmites australis*, um exemplo. A presença das plantas no sistema é essencial, visto que contribuem para a desidratação e a mineralização do lodo.

Os sólidos acumulados na superfície sofrem desidratação através da percolação da parte líquida pelo do meio filtrante e pelo processo de evapotranspiração das plantas. O período de repouso contribui também para o processo de desidratação, pois o movimento das plantas promove rachaduras na camada seca de lodo na superfície o que facilita a evaporação de água e transferência de oxigênio para as camadas inferiores. Esta transferência de oxigênio para as camadas inferiores intensifica as condições aeróbicas, garantindo a ação dos microorganismos aeróbicos em todo o sistema, e aumentando a mineralização do lodo (NIELSEN, 2003).

Segundo Nielsen (2015) o período total de tratamento do lodo nesses sistemas é de aproximadamente entre 10 a 12 anos. A vida útil do WCL varia para mais ou menos anos de operação dependendo, principalmente, da frequência de alimentação de lodo e a TAS adotada e/ou efetuada na prática.

A desidratação é o aspecto principal no tratamento do lodo, visto que quanto maior o teor de sólidos no lodo menor será o volume e os custos com a disposição final. Uggetti *et al.* (2010) relatam que em média a concentração de sólidos totais aumenta de 1-4% no lodo afluente ao sistema para 20-30% após o período final de tratamento.

Conforme relata De Maeseneer (1997), após o período final de desaguamento, a concentração de sólidos totais situa-se entre 35 a 40%. E, segundo afirma Nielsen (2003), a concentração de sólidos totais pode ser de aproximadamente 40%, considerando um período de tratamento de 10 anos.

A mineralização do lodo está relacionada, entre outros, com o teor de sólidos voláteis, o qual se relaciona com a concentração de matéria orgânica, sendo reduzido devido aos processos biológicos ocorridos no sistema. De acordo com Uggetti *et al.* (2010) pode ser alcançado uma redução de sólidos voláteis de 25-30%, durante o período de tratamento, chegando a uma concentração final de sólidos voláteis de 40-50% no tratamento de lodo com WCL.

2.2.1.4.2 Macrófitas

As macrófitas são definidas como plantas aquáticas, emergentes ou emersas, que se desenvolvem em zonas úmidas, os *wetlands*. Entre as principais funções das macrófitas em *wetlands* construídos tem-se a

estabilização da superfície do leito, promoção de boas condições para filtração e provimento de grande área superficial para crescimento microbiano (BRIX, 1997).

Segundo Uggetti *et al.* (2010), no tratamento de lodo, em WCL, as macrófitas são componentes importantes do sistema para a desidratação e mineralização do lodo. Os processos de desidratação, principalmente, pela contribuição da evapotranspiração e movimentos da planta que impulsionam a formação de sulcos na superfície do leito e permitem maior infiltração (NIELSEN, 2003).

Essas plantas precisam ser resistentes a determinadas condições, a escolha da macrófita para esses sistemas, deve considerar: rápido crescimento sob condições de estresse, elevada capacidade de transpiração, sistema radicular profundo, fácil plantio, tolerância a diferentes níveis de água, pH e salinidade (DE MAESENEER, 1997).

Conforme cita Käfer (2015), a partir da análise de estudos de diversos autores nacionais e internacionais, entre as espécies plantas mais empregadas no tratamento de lodo tem-se *Phragmites australis*, *Typha SP* e *Typha domingensis*; e em menor ocorrência, outras espécies, tais como: *Echinochloa pyramidalis*, *Cyperus papyrus*, *Zizaniopsis bonarienses* e *Vetiveria zizanioides*.

Quanto à adaptação inicial de macrófitas em WCL existem poucos estudos realizados e publicados. Magri *et al.* (2010) relatam que em WCL de 0,8 m² de área superficial, com TAS de 200 kg ST.m⁻².ano⁻¹, nos três primeiros meses de operação do sistema, a espécie *Cyperus papyrus* foi a que obteve o maior e mais rápido aumento, em relação ao número de indivíduos, comparado com as outras espécies estudadas: *Zizaniopsis bonarienses* e *Thypha domingensis*.

Koottatep *et al.* (2005) reporta dados a cerca de WCL em unidades experimentais de 25 m² cada, utilizando a espécie *Typha augustifolia*. Os autores relatam que após dez meses do início do plantio, com TAS entre 80 a 500 kg ST.m⁻².ano⁻¹, as alturas variavam de 1,5 a 1,8 m, durante esse período, as plantas apresentaram problemas, principalmente, quando aplicado TAS de 500 kg ST.m⁻².ano⁻¹, necessitando de um a dois meses para recuperação. Após, decorridos três meses de adaptação a fase com aplicação de TAS de 250 kg ST.m⁻².ano⁻¹ e mais quatro meses de operação, as plantas desenvolveram-se melhor chegando a alturas entre 3,6 a 4,0 m, valores maiores que os encontrados em ambientes naturais.

Kengne *et al.* (2008) monitorou durante um ano seis unidades pilotos de 1 m² cada, com macrófitas da espécies *Echinochloa pyramidalis* e *Cyperus papyrus*. As TAS aplicadas eram de 100, 200 e

300 kg kgST.m⁻².ano⁻¹. Quanto ao crescimento das plantas a *E. pyramidalis* apresentou crescimento flutuante nos três primeiros meses, mas ao final do monitoramento chegaram próximas em média a 250 cm. O WCL com *C. Papyrus*, com aplicação de TAS de 100 kgST.m⁻².ano⁻¹, apresentou maior crescimento nos primeiros quatro meses de operação, chegando a valores médios maiores do que 200 cm ao final do monitoramento, para todas as unidades com essa espécie. Ambas as espécies apresentaram alturas médias maiores do que o encontrado em *wetlands* naturais.

Ambos os estudos citados foram realizados em países de clima tropical, o primeiro no sul do Brasil, o segundo na Tailândia e o último no Camarões.

3 METODOLOGIA

3.1 LOCAL DO ESTUDO

O local da pesquisa, na qual as atividades em campo de monitoramento foram desenvolvidas, situa-se em uma Estação de Tratamento de Esgoto de um loteamento residencial, situado na região metropolitana da Grande Florianópolis. Esta ETE foi projetada e implantada em 2003, para uma população de projeto de 6.800 habitantes.

A ETE possui tratamento biológico de lodos ativados com reatores em bateladas sequenciais (RBS), sendo dois reatores em operação. O lodo de esgoto proveniente do tratamento do efluente é encaminhado e tratado em WCL, como unidade de tratamento de lodo da ETE. Existem quatro unidades de WCL, cada um com área de 400 m², porém apenas uma unidade será objeto desse estudo.

3.1.1 Estação de Tratamento de Esgoto

O efluente sanitário do loteamento residencial chega à estação elevatória de esgoto bruto através da rede coletora de esgotos. A primeira etapa é o tratamento preliminar, composto por gradeamento e desarenador. O tratamento secundário consiste no tratamento biológico aeróbico com reatores em bateladas sequenciais. Após o efluente tratado passa pelo tanque de contato, no qual é aplicado desinfetante (Hipoclorito de Sódio a 12%), e depois disposto em corpo receptor próximo a estação.

O lodo em excesso retirado dos reatores é desidratado e mineralizado nos WCLs, também, chamados de canteiros de mineralização. O líquido percolado é drenado e retorna para o sistema de tratamento.

O fluxograma simplificado do sistema de tratamento é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma simplificado do sistema de tratamento da ETE.



3.1.2 Descrição do *Wetland* para Tratamento de Lodo

Cada WCL possui 400 m² (10 m x 40 m) de área superficial. A profundidade total é de 1,90 m, composto por camadas, da parte inferior para a superior: 30 cm de argila; 20 cm de brita n° 4; 20 cm de areia grossa; e no restante tem-se a camada disponível de descarga e acumulação de lodo.

As tubulações de drenagem do líquido percolado e de alimentação de lodo possuem diâmetro de 100 mm.

O WCL em estudo após implantação permaneceu durante 10 anos recebendo lodo proveniente dos RBS da ETE e lodo de esgoto anaeróbico proveniente de residências unifamiliares, transportados por caminhões autovácuo.

Depois do período de operação, entrou em período de repouso em 2016. No início de 2018 efetuou-se a remoção da camada de lodo desidratado e preparou-se a unidade para reiniciar o processo de tratamento de lodo.

3.2 PLANTIO DAS MACRÓFITAS

Para efetuar o acompanhamento das macrófitas foi necessário fazer o plantio de mudas de três espécies selecionadas para o estudo. Assim, no dia 02/08/2018 foram plantadas 10 unidades de macrófitas, conforme Figura 3, das espécies *Cyperus alternifolius*, *Vetiveria zizanioides* e *Typha domingensis*.

As mudas de *Cyperus alternifolius*, conhecida como Sombrinha Chinês, e de *Vetiveria zizanioides*, conhecida como Vetiver, foram

retiradas de um *wetland* de tratamento de efluentes residuais, de uma empresa privada. Para o transporte até o WCL as mudas foram armazenadas em sacos plásticos e preservadas com a matéria orgânica que já continham.

As mudas de *Typha domingensis*, conhecidas como Taboa, foram retiradas da unidade de WCL ao lado do WCL em estudo. Antes do replantio foram cortadas permanecendo com média de 65 cm de comprimento.

A espécie *Cyperus giganteus*, conhecida como papiros gigante, também incluída neste estudo, já estava plantada no WCL desde abril de 2018, portanto selecionou-se 10 unidades dessa espécie para realizar o acompanhamento.

As plantas de papiros gigante escolhidas estavam localizadas próximas as outras mudas de espécies plantadas. As mudas de Papiros Gigante, plantadas anteriormente ao início deste estudo, haviam sido retiradas do próprio WCL na fase de remoção da camada de lodo desidratado.

Após o plantio, identificaram-se todas as plantas com nome e número, mediu-se a altura e efetuou-se o registro com fotos.

Figura 3 - Plantio de mudas: a) Uso de pá para abrir espaço para a muda; b) Colocação da muda.



3.3 MONITORAMENTO

O período de monitoramento compreendeu cerca de dois meses, com início em 02/08/2018 e término em 09/10/2018. Ao todo foram

realizadas quatro visitas para acompanhamento das macrófitas. As visitas ocorreram em: 02/08, 28/08, 21/09 e 09/10/2018. Apenas na visita do dia 21/09/18 não foi possível a coleta de dados devido à impossibilidade de adentrar no WCL, visto que a altura da camada de lodo estava com cerca de 40 cm em algumas regiões. Porém, nesse dia, para algumas unidades de macrófitas monitoradas foi possível fazer o registro fotográfico.

Durante o período de avaliação da adaptação das macrófitas foram verificados os seguintes parâmetros: a altura, taxa de crescimento e número de indivíduos.

Foram avaliados também aspectos visuais como alterações de cor, murchamento, morte e danos causados por insetos ou alterações ambientais. O Quadro 5 indica quais os parâmetros foram avaliados para cada espécie dentre as macrófitas em estudo.

Quadro 5 - Resumo dos parâmetros analisados de acordo com cada espécie de macrófitas em estudo.

Espécie	Altura	Taxa de Crescimento	Número de Indivíduos	Avaliação Qualitativa
<i>Cyperus alternifolius</i>	X	X		X
<i>Cyperus giganteus</i>	X	X	X	X
<i>Vetiveria zizanioides</i>	X	X		X
<i>Typha domingensis</i>	X	X		X

3.3.1 Desenvolvimento das Macrófitas

3.3.1.1 Altura e Taxa de Crescimento

A altura das plantas foi medida com trena, da superfície do WCL até a ponta de folha mais alta do conjunto de indivíduos.

A partir das medições efetuadas durante as visitas ao WCL pode-se estimar a taxa de crescimento das espécies, conforme a Equação 1, indicada por Esteves (1998, apud Suntti, 2010).

$$TC = \frac{C2 - C1}{T2 - T1} \quad (1)$$

Onde, as variáveis C1 e C2 representam o comprimento médio das plantas nos tempos 1 e 2 em cm, e T1 e T2 o intervalo entre as coletas de dados em dias.

3.3.1.2 Número de Indivíduos

Para as plantas da espécie *Cyperus giganteus* também se observou a quantidade de indivíduos novos desenvolvidos durante o período de estudo, através da contagem dos mesmos.

3.3.1.3 Análise Qualitativa

A análise qualitativa envolveu a observação decorrente das visitas ao WCL e o registro fotográfico, nos quais podem ser identificados aspectos visuais como murchamento, morte, ressecamento, e outros danos provocados por insetos ou alterações ambientais.

3.3.2 Alimentação do *Wetland* para Tratamento de Lodo

A alimentação do WCL durante o estudo foi, exclusivamente, de lodo de esgoto proveniente do sistema de tratamento de lodo ativado (reatores RBS) da estação.

Após o plantio, não houve a descarga de lodo no WCL, sendo apenas alimentado com água a cada dois dias, com o uso de mangueira de caminhão de hidrojateamento até o início da alimentação com lodo. Porém, o intervalo entre plantio e início da alimentação foi curto, devido ao tempo de monitoramento da pesquisa ser pequeno (cerca de dois meses) e as mudas terem sido retiradas de locais que já possuíam alimentação estabelecida (esgoto sanitário ou lodo de esgoto, no caso das mudas de *Typha domingensis*).

No dia 07/08/2018 iniciou-se a alimentação do WCL com o lodo de esgoto da estação. A frequência da descarga de lodo foi variável, pois dependia da necessidade de retirada do excesso de lodo dos reatores.

A vazão de descarga do lodo foi determinada através de medição de vazão com método volumétrico, utilizando-se recipiente de volume conhecido e cronômetro. O volume diário de lodo aplicado foi calculado relacionando a vazão de descarga aferida em campo com os tempos de retirada de lodo registrados pelo operador da ETE.

Para o cálculo de taxa de aplicação de lodo foram coletadas duas amostras de lodo da tubulação de alimentação do WCL, em dias diferentes durante o período de monitoramento. As amostras foram coletadas para análise da concentração de sólidos totais, que foram realizadas por laboratório contratado.

3.3.2.1 Taxa de Aplicação Superficial e Taxa de Aplicação Hidráulica

A taxa de aplicação superficial foi obtida através da Equação 2.

$$TAS = \frac{Cst \times V}{At} \quad (2)$$

Onde, a variável Cst corresponde a concentração de ST no lodo de alimentação em kg.m^{-3} , V o volume médio aplicado em m^3 , e At a área total do WCL em funcionamento em m^2 .

O volume médio de lodo aplicado foi obtido considerando-se a média dos volumes acumulados em cada mês, do período de monitoramento (07/08/18 a 08/10/18).

A taxa de aplicação hidráulica (TAH) foi obtida aplicando-se a Equação 3.

$$TAH = \frac{Q}{At} \quad (3)$$

Onde, a variável Q é igual à vazão diária de alimentação em $\text{m}^3.\text{d}^{-1}$ e At a área total do WCL em funcionamento em m^2 .

Para o cálculo da vazão diária também se considerou a média das vazões médias diárias em cada mês do período de monitoramento (07/08/18 a 08/10/18).

3.4 BALANÇO HÍDRICO

Para o cálculo do balanço hídrico considerou-se a variação entre a soma do volume de entrada de lodo com a precipitação pluviométrica incidente no WCL, e a quantidade de efluente (líquido percolado) que sai do sistema, considerando-se indiretamente as perdas de água por evapotranspiração e retenção no leito (BORIN *et al.*, 2011 apud KÄFER, 2015).

Conforme citado por Käfer (2015), a maioria dos estudos quanto ao desempenho de desaguamento em sistemas de tratamento de lodo ou efluentes residuais não utilizam os dados de evapotranspiração. Ainda, a autora cita que para que se obtenham dados mais precisos de evapotranspiração são necessários métodos mais complexos de análise.

Os dados de precipitação pluviométrica foram registrados pelo operador da estação, através de pluviômetro instalado próximo ao WCL.

O operador realiza esse registro diário para o controle da operação da ETE, de modo que foram utilizados os dados diários referentes ao período de estudo. Para o cálculo do volume médio mensal de precipitação utilizou-se a média entre os volumes acumulados em dois meses, no período de 07/08/18 a 08/10/18.

O volume de saída do líquido percolado foi obtido pela medição da vazão de saída, por método volumétrico, e os tempos de retirada efetuados pela bomba da estação elevatória de líquido percolado, o qual é monitorado via sistema de telemetria cujos dados estão disponíveis em plataforma de acesso online.

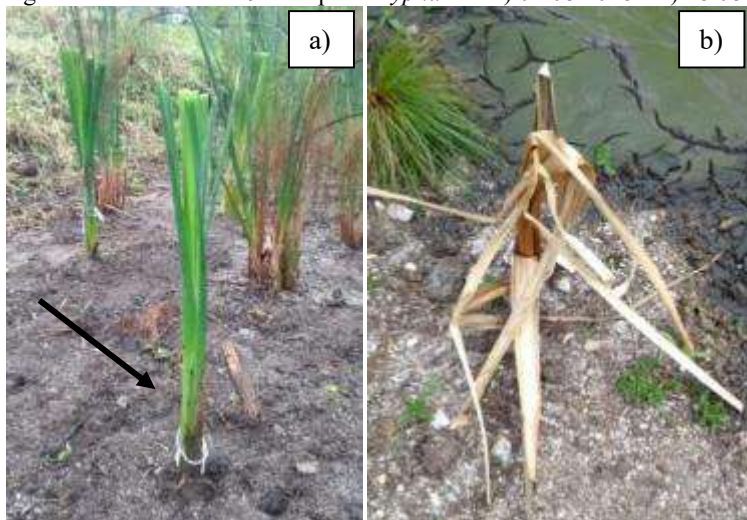
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DESENVOLVIMENTO DAS MACRÓFITAS

4.1.1 *Typha domingensis*

Das quatro espécies de macrófitas monitoradas, neste estudo, apenas as mudas de *Typha domingensis* não conseguiram se desenvolver no WCL. Em 28/08/2018, após 20 dias do plantio, verificou-se que todas as mudas estavam com as folhas secas e murchas, conforme exemplificado na Figura 4.

Figura 4 – Macrófita n° 9 da espécie *Typha* em: a) 02/08/2018 e b) 28/08/2018.



No mesmo dia, decidiu-se parar o acompanhamento das mudas nesse trabalho, pois como as macrófitas não apresentaram desenvolvimento positivo, não haveria dados quantitativos e qualitativos do crescimento dessas macrófitas para serem registrados.

A espécie *Typha domingensis* é indicada como uma macrófita para uso em WCL, com pesquisas comprovando seu desempenho. Magri *et al.* (2016), afirmam que a macrófita *Typha* promove bom desaguamento e remoção de matéria orgânica e nutrientes e é recomendada para a aplicação em WCL. Ainda, os autores, relatam a remoção eficiente de nitrogênio amoniacal total, principalmente, com essa espécie, resultado associado à profundidade das raízes, que podem

chegar até a camada de fundo do WCL. O sistema estudado por Magri *et al.* (2016) possuía 0,8 m² de área superficial e era alimentado com lodo proveniente de tanques sépticos com TAS aplicada de 150 kgST.m⁻².ano⁻¹ e o líquido percolado do próprio WCL.

Em outro estudo, a macrófita *Typha domingensis* obteve os melhores resultados referente ao desaguamento e a qualidade dos líquidos percolados. Na fase de monitoramento analítico, o WCL com essa espécie, alcançou em média 71% de remoção de água nos ciclos de alimentação efetuados e apresentou remoção de 80% da carga de DQO e fósforo, bem como remoção de 72% da carga de amônia no efluente gerado, utilizando-se da recirculação dos líquidos percolados. O WCL desse estudo possuía uma área superficial de 1,6 m², com utilização de uma TAS de 300 kgST.m⁻².ano⁻¹ (KÄFER, 2015).

No estudo deste trabalho, o não desenvolvimento dessas macrófitas pode estar relacionado com a falta de lodo disponível no local onde estavam plantadas (lado oposto a entrada de lodo). Pois, como se percebe pela Figura 4 o local onde se encontrava a macrófita estava seco. De fato, na visita realizada em 28/08/18, observou-se que o lodo não estava distribuído homoganeamente pelo WCL, estando mais presente do lado da tubulação de entrada de lodo e na região central.

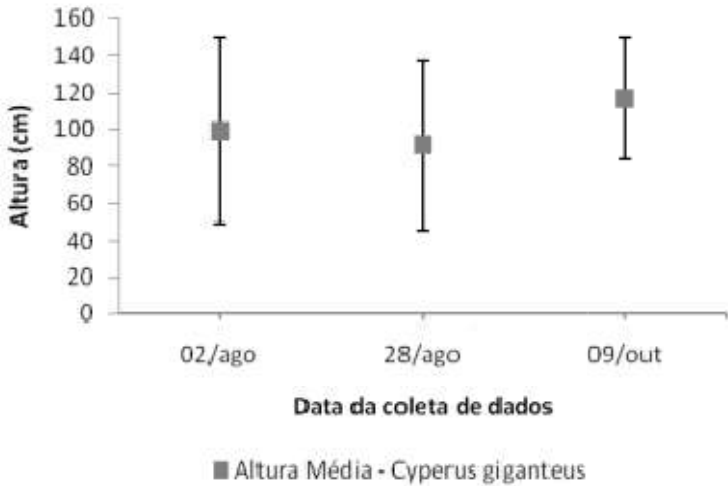
Além disso, antes do plantio as macrófitas estavam no WCL ao lado, o qual se encontra com alta camada de lodo, e, portanto, o replantio em um sistema com condição contrária pode ter afetado o desenvolvimento dessas plantas.

4.1.2 *Cyperus giganteus*

As macrófitas da espécie *Cyperus giganteus* já estavam plantadas, há aproximadamente três meses, quando do início do monitoramento. Na primeira visita efetuada, quando se realizou a escolha das plantas que iriam ser acompanhadas, essas estavam em média com cerca de 1,50 metros de comprimento, considerando o indivíduo mais alto da planta.

Quanto aos resultados do acompanhamento quantitativo, os gráficos da altura média, taxa de crescimento média e número médio de indivíduos são apresentados nas Figuras Figura 5, Figura 6 e Figura 7, respectivamente.

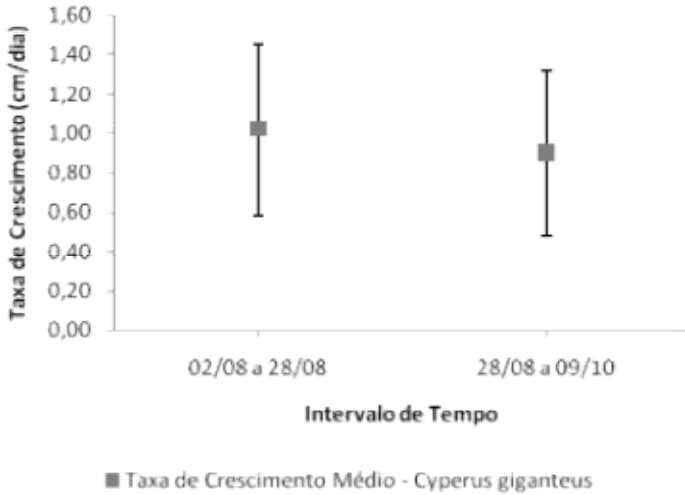
Figura 5 - Gráfico da Altura Média com Desvio Padrão da espécie *Cyperus giganteus* durante o período de monitoramento.



Observa-se que houve um aumento na altura média das macrófitas de 15,4%, da primeira visita efetuada em relação à última.

Os valores de altura registrados no período de monitoramento, conforme gráfico da Figura 5, possuem um intervalo grande de variação. Isto pode ser devido às medições terem sido efetuadas em vários indivíduos de uma mesma planta, de forma a ter um acompanhamento mais representativo do crescimento dos indivíduos da macrófita. De modo a exemplificar, no período de coleta de dados, a menor e maior altura registrada foram 21 e 182 cm, com uma diferença entre os valores de 88,5%.

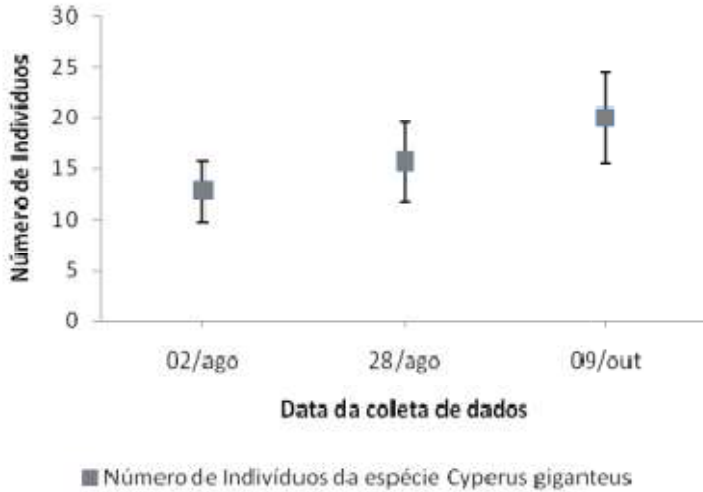
Figura 6 - Gráfico da Taxa de Crescimento Média com Desvio Padrão da espécie *Cyperus giganteus* durante o período de monitoramento.



A taxa de crescimento média verificada no período de monitoramento foi positiva. Pelo gráfico da Figura 6 observa-se que os valores médios são aproximados, com 1,02 cm/dia no primeiro intervalo (26 dias) e 0,90 cm/dia no segundo intervalo (42 dias).

Assim, em média, registrou-se um crescimento maior durante os primeiros 26 dias de monitoramento.

Figura 7 - Número Médio de Indivíduos com Desvio Padrão da espécie *Cyperus giganteus* durante o período de monitoramento.



Decorrente do gráfico da Figura 7 verifica-se que houve aumento no número médio de indivíduos registrados nas macrófitas em todas as visitas efetuadas com coleta de dados. Em média obteve-se 13, 16 e 20 indivíduos registrados na primeira, segunda e última visita, respectivamente, representando um aumento de 65% no número médio de indivíduos em relação a primeira e última visita.

Em estudo realizado por Magri *et al.* (2010), a espécie *Cyperus papyrus* (espécie do mesmo gênero que *Cyperus giganteus*) dentre três espécies foi a que teve a maior e mais rápida adaptação ao sistema. O aumento no número de indivíduos variou em 97% do primeiro ao segundo mês, diminuindo 90% do segundo ao terceiro mês.

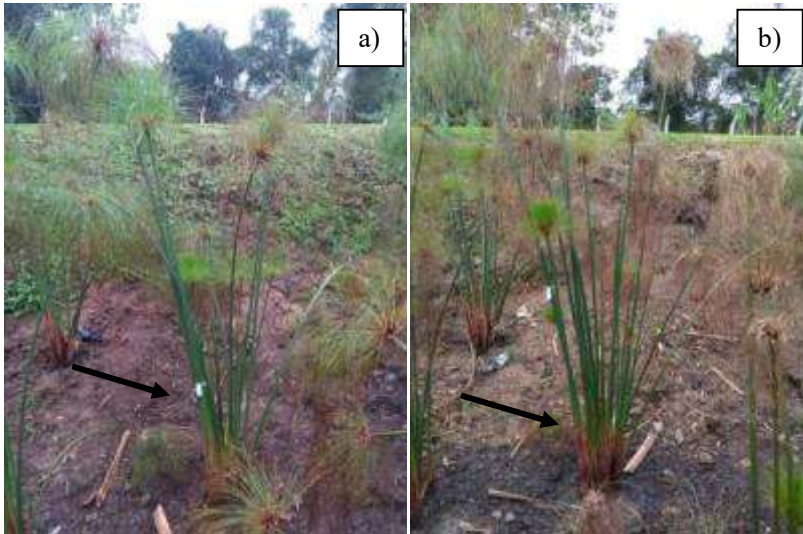
Referente à avaliação qualitativa, percebeu-se que ao longo do período de acompanhamento, a coloração das macrófitas sofreu alterações, principalmente, com o aumento do volume de lodo aplicado no WCL. Antes do início da alimentação de lodo, todas as plantas observadas estavam com coloração verde e aparência vistosa.

Na visita realizada após o início da alimentação, a maioria das plantas apresentava coloração amarelada. Essa constatação foi se tornando mais evidente nas outras visitas, com maior registro de indivíduos com coloração amarelada e ressecada, inclusive nos indivíduos menores (brotos).

Em conjunto com a alteração da coloração também se notou o aumento da presença de indivíduos caídos e/ou murchos a cada visita efetuada. Porém, durante o período de monitoramento, não se registrou a morte e/ou danos causados por insetos ou alterações ambientais.

Para exemplificar as alterações ocorridas, apresenta-se o registro fotográfico da mesma planta ao longo do período de estudo. Dessa forma, na Figura 8 tem-se o exemplar registrado no mês de agosto, antes e após o início da alimentação com lodo de esgoto sanitário.

Figura 8 – Macrófita n° 2 da espécie *Cyperus giganteus* em: a) 02/08/18; b) 28/08/18.



A partir da Figura 8 b) percebe-se que mesmo após 20 dias do início da alimentação, ainda não havia se formado uma camada de lodo ao redor de algumas macrófitas, em virtude da má distribuição de lodo de alimentação. Na visita efetuada em 28/08/18, pode-se notar a presença de folhas ressecadas na macrófita, talvez associado à falta de água e/ou camada de lodo.

Nas Figuras 9 e 10 tem-se o registro das duas visitas realizadas, uma no mês de setembro e a outra em outubro, quando a camada de lodo se encontrava nos locais mais profundos (meio do WCL) com cerca de 40 cm e 20 cm, respectivamente.

Figura 9 - Macrófita n° 2 da espécie *Cyperus giganteus* em: 21/09/18.



Através da Figura 9 observa-se que todas as macrófitas de mesma espécie apresentavam condições semelhantes, com folhas ressecadas, aparentando estarem queimadas. A macrófita identificada na imagem da Figura 9 também apresentou indivíduos caídos e/ou murchos.

O ressecamento observado nas macrófitas dessa espécie pode ter relação com um excesso de nutrientes no meio, provocado pelo aumento de volume de lodo no período entre duas visitas (28/08 a 21/09).

Figura 10 - Macrófita n° 2 da espécie *Cyperus giganteus* em: 09/10/18.

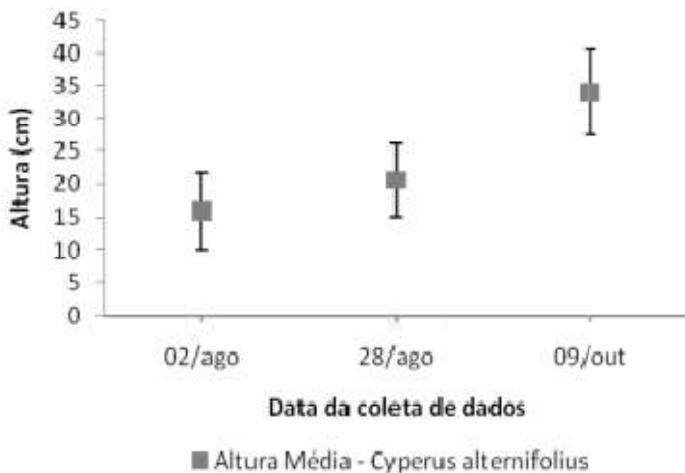


O que pode ser observado da Figura 10, é que apesar de permanecer ainda com indivíduos ressecados e/ou caídos, identificam-se também folhas verdes, em melhores condições estéticas.

4.1.3 *Cyperus alternifolius*

Referente às mudas de *Cyperus alternifolius* verificou-se nitidamente o desenvolvimento das mesmas durante o monitoramento. Nas Figuras Figura 11 e Figura 12 apresentam-se os gráficos de altura média e taxa de crescimento média referente ao acompanhamento quantitativo das macrófitas dessa espécie.

Figura 11 - Gráfico da Altura Média com Desvio Padrão da espécie *Cyperus alternifolius* durante o período de monitoramento.



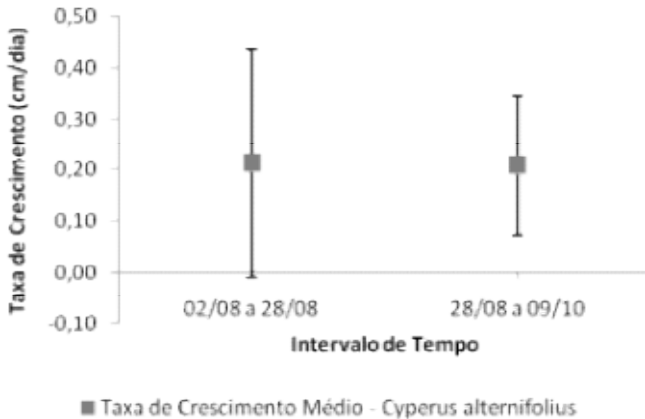
A partir do gráfico da Figura 11 constata-se que o crescimento das macrófitas, em média, aumentou durante o período de coleta de dados. Observa-se que a altura média, em relação a primeira visita para a última, aumentou em 53%.

O valor da altura média observada na última visita efetuada é de aproximadamente 10 cm maior que o valor anterior registrado. Tal fato pode estar relacionado com a situação constatada em 21/09/2018, em que a camada de lodo estava com cerca de 40 cm, principalmente, na região onde a maioria das mudas dessa espécie estavam plantadas (lado oposto a entrada de lodo).

Tal situação, além de impedir a coleta de dados nesse dia, também comprometeu o restante da pesquisa, pois o lodo cobriu essas mudas, que estavam com altura entre 11 e 24 cm, de modo que não sobreviveram.

Assim, a coleta de dados da última visita contemplou apenas aquelas mudas que estavam em região com menor camada de lodo, na parte frontal do WCL.

Figura 12 - Gráfico da Taxa de Crescimento Média com Desvio Padrão da espécie *Cyperus alternifolius* durante o período de monitoramento.



A taxa de crescimento média obtida nos dois intervalos de tempo foi praticamente a mesma, de 0,21 cm/dia. Porém, observa-se que no menor intervalo de tempo, ou seja, o primeiro, o crescimento médio registrado foi maior. O desvio padrão entre os valores, conforme Figura 12, foi maior no primeiro intervalo de tempo, pois houve plantas que não apresentaram nenhum crescimento enquanto outras aumentaram mais de 10 cm.

Quanto ao monitoramento qualitativo, a maioria das mudas plantadas apresentou surgimento de novas folhas ao longo do acompanhamento efetuado. Nas primeiras duas visitas para coleta de dados, as plantas que apresentavam folhas estavam com coloração verde e em cada nova visita podia ser registrado o surgimento de novos brotos.

A coloração verde também estava evidente na visita do dia 21/09/18, para aquelas mudas que estavam aparentes. Porém, ressalta-se que o monitoramento qualitativo foi prejudicado, visto que a maioria das macrófitas dessa espécie não ficou mais aparente.

Em nenhuma visita foi registrada a morte e/ou danos causados por insetos ou alterações ambientais. Porém, na última visita identificou-se ressecamento e murchamento de folhas.

De forma a demonstrar as alterações ocorridas no período de monitoramento apresenta-se o registro fotográfico da mesma macrófita, sendo um dos exemplares que não foram cobertos por lodo.

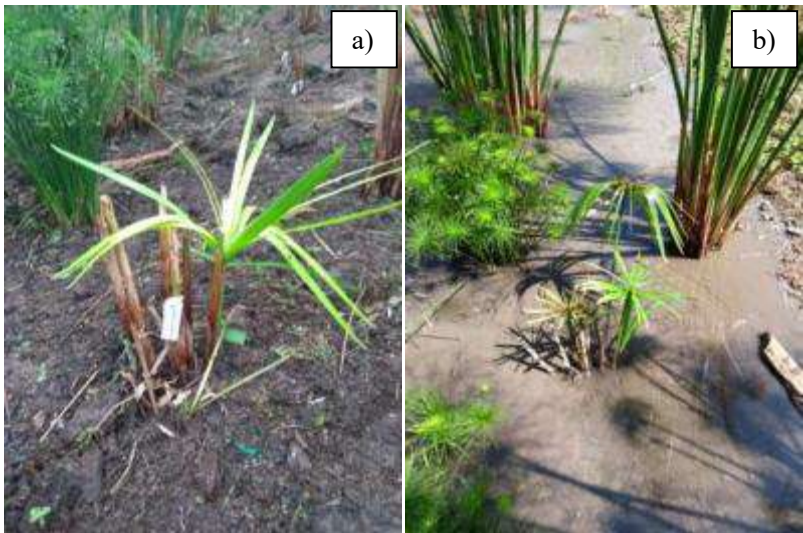
A Figura 13 apresenta a macrófita após o seu plantio no WCL, com 15 cm de caule, antes do início da alimentação. Na Figura 14 têm-

se imagens da macrófita nas visitas realizadas no final dos meses de agosto e setembro.

Figura 13 – Macrófita n° 1 da espécie *Cyperus alternifolius* em: 02/08/18.



Figura 14 - Macrófita n° 1 da espécie *Cyperus alternifolius* em: a) 28/08/18 e b) 21/09/18.



Nota-se, pela Figura 14 a), que apesar de já ter iniciado a introdução de lodo, quando do registro da macrófita, ainda não havia

formado camada de lodo na região onde a mesma estava localizada (região frontal do WCL). Mas a falta de lodo não impediu o desenvolvimento da planta, verificado pelo surgimento das folhas.

Ainda, pela Figura 14 b), percebe-se que o desenvolvimento continua ocorrendo, inclusive com o surgimento de novos brotos. O registro nesse dia (21/09/18) foi possível, pois a macrófita se encontrava na região frontal do WCL próximo a borda externa (lado oposto a tubulação de alimentação).

Na última visita realizada, verifica-se pela Figura 15 que há sinais de ressecamento e certo caimento do indivíduo que apresentava a maior altura anteriormente.

Figura 15 – Macrófita n° 1 da espécie *Cyperus alternifolius* em: 09/10/18.



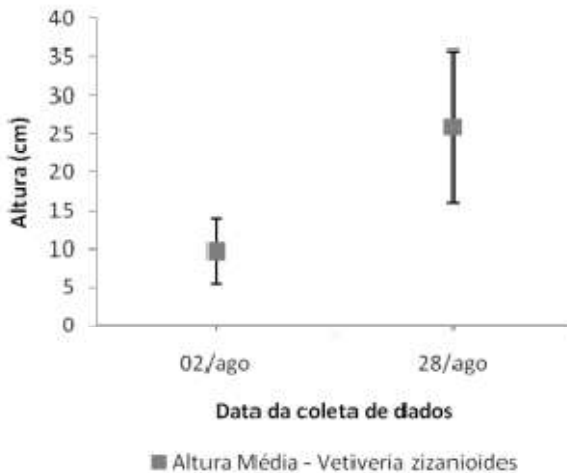
4.1.4 *Vetiveria zizanioides*

O desenvolvimento das mudas da espécie *Vetiveria zizanioides* tornou-se perceptível após a introdução de lodo de esgoto no WCL, tanto no acompanhamento quantitativo quanto no qualitativo. Assim como relatado no item anterior, também houve prejuízos a coleta de

dados dessa espécie, pois as mesmas estavam com aproximadamente 25 cm, em média, na data de 21/09/18, quando se observou camada de lodo de cerca de 40 cm em algumas regiões do WCL, de forma que todas as mudas foram cobertas, com exceção de uma (entre 10 unidades) que estava na região frontal do WCL.

As Figuras Figura 16 e Figura 17 apresentam o gráfico da altura média e taxa de crescimento média, respectivamente, no período em que foi possível o monitoramento.

Figura 16 - Gráfico da Altura Média com Desvio Padrão da espécie *Vetiveria zizanioides* durante o período de monitoramento.



A partir da análise do gráfico da Figura 16 constata-se o crescimento das macrófitas dessa espécie no intervalo do plantio e a visita posterior ao início da alimentação do WCL. Observa-se que neste intervalo, a altura média das macrófitas obteve um aumento de 160%.

Ainda, percebe-se um desvio padrão maior nos dados registrados em 28/08/18, relacionado com a diferença de crescimento entre as mudas, visto que algumas tiveram pequeno crescimento ou nenhum crescimento, e outras obtiveram um crescimento de até 78% no intervalo entre as coletas de dados.

Optou-se por não incluir no gráfico de altura média a coleta de dados da última visita (09/10/18), pois apenas uma macrófita permaneceu aparente, após a situação relatada, da visita realizada no

mês de setembro. Porém, o crescimento da macrófita restante foi registrado na última visita, sendo um aumento de 26 cm no intervalo de 42 dias.

Figura 17 - Gráfico de Taxa de Crescimento Média com Desvio Padrão da espécie *Vetiveria zizanioides* durante o período de monitoramento.



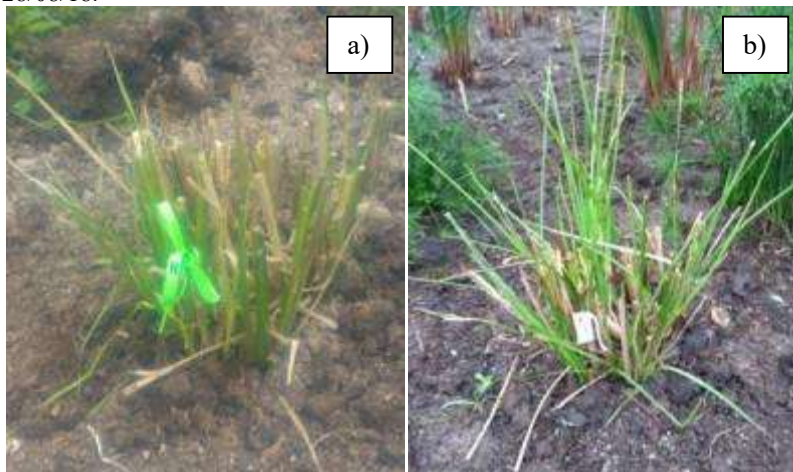
O gráfico da Figura 17 demonstra a diferença existente entre o crescimento das macrófitas, pelo desvio padrão obtido, e de acordo com o observado no gráfico de altura média. Obteve-se taxa de crescimento médio de zero a maior do que 1,0 cm/dia.

Para a macrófita sobrevivente ao final da pesquisa, obteve-se uma taxa de crescimento médio de 0,62 cm/dia (intervalo de 42 dias).

Referente ao monitoramento qualitativo, nos vinte e seis dias decorridos do plantio até a visita seguinte, a maioria das macrófitas dessa espécie estava apresentando o desenvolvimento de folhas verdes. Porém, após a visita de 21/09/18, não foi mais possível acompanhar a evolução da maioria das mudas, visto que somente uma não havia sido coberta por lodo.

A Figura 18 apresenta a macrófita que permaneceu aparente durante todo o período de monitoramento.

Figura 18 – Macrófita n° 1 da espécie *Vetiveria zizanioides* em: a) 02/08/18; b) 28/08/18.



Nota-se, a partir da Figura 18, o bom desenvolvimento da macrófita, com crescimento visível das folhas. Ainda, observa-se que mesmo sem camada de lodo, após o início da alimentação (Figura 18 b), a macrófita apresenta coloração verde, sem sinais de ressecamento ou murchamento aparente.

Na Figura 19 tem-se o registro efetuado no dia 21/09/18, no qual se percebe que o desenvolvimento da macrófita estava ocorrendo, através do crescimento das folhas. A princípio, não houve sinais de ressecamento e/ou indivíduos caídos como observado para as outras espécies de macrófitas do estudo.

Para essa espécie, em nenhuma visita realizada foi registrada a morte e/ou danos causados por insetos ou alterações ambientais.

Figura 19 – Macrófita n° 1 da espécie *Vetiveria zizanioides* em: 21/09/18.



Na última visita realizada a planta continuava com o desenvolvimento observado nas outras visitas, sem sinais de ressecamento ou folhas caídas.

4.2 ALIMENTAÇÃO DO *WETLAND* PARA TRATAMENTO DE LODO

4.2.1 Vazão Diária e Volume Aplicado

O volume diário aplicado de lodo ao WCL foi obtido através do controle operacional efetuado pelo operador da ETE, o qual registra o tempo de retirada do lodo, em minutos, para cada reator. Esse registro é feito mensalmente, portanto utilizaram-se os registros efetuados nos meses de agosto a outubro. Os cálculos consideraram o dia inicial de aplicação de lodo (07/08/18).

A vazão de descarga no WCL medida por método volumétrico junto à tubulação de entrada de lodo foi de 2,33 L/s ou 8,28 m³/h.

A vazão média diária, volume acumulado e médio mensal de lodo aplicado no WCL no período de monitoramento são apresentados na Tabela 1.

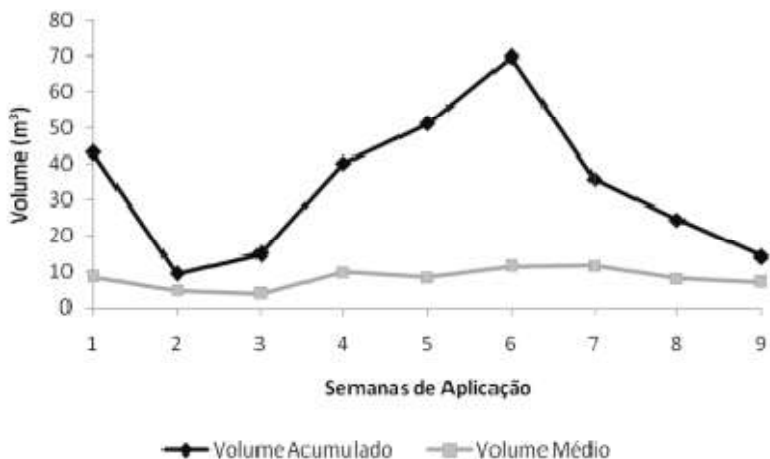
Tabela 1 - Vazão Média Diária e Volume Acumulado e Médio Mensal de lodo aplicado durante o período de monitoramento.

Período	Vazão Média Diária ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	Volume Acumulado Mensal (m^3)
07/08/2018 a 07/09/2018	7,10	134,97
08/09/2018 a 08/10/2018	9,80	196,04
Vazão Média	8,45	165,51

Observa-se na Tabela 1 que no segundo período se obteve o maior volume de lodo aplicado ao WCL, representando um aumento de 31% entre os dois intervalos de tempo.

Na Figura 20 apresenta-se o volume acumulado e o volume médio de lodo em cada semana de aplicação, a partir do primeiro dia da introdução de lodo no WCL (07/08/18) até o final do período de acompanhamento das macrófitas.

Figura 20 - Volume Acumulado e Volume Médio de Lodo em cada semana de aplicação, durante o período de monitoramento.



A partir da análise do gráfico da Figura 20 constata-se que houve grande variação no volume acumulado aplicado em cada semana. Ressalta-se que a retirada de lodo dos reatores e, conseqüente, alimentação do WCL, atendeu as necessidades da estação de tratamento, operando em escala real. Além disso, durante o período de estudo, o

WCL não estava operando com ciclos de alimentação e descanso bem definidos.

O menor volume acumulado em uma semana, de 9,35 m³, ocorreu na segunda semana de aplicação (metade do mês de agosto) e o maior volume acumulado em uma semana, de 69,62 m³, ocorreu na sexta semana (metade do mês de setembro), representando um aumento de 86% no volume de lodo acumulado entre esse intervalo de tempo.

Esse pico no volume de lodo acumulado, observado na sexta semana de aplicação, corrobora a situação encontrada da alta camada de lodo no WCL, em 21/09/18. Visto que houve a introdução do maior volume de lodo acumulado em uma semana, durante o período de monitoramento, antes do dia da visita realizada em setembro.

4.2.2 Concentração de Sólidos Totais e Taxas de Aplicação

As concentrações de sólidos totais obtidas e a média calculada para o período de monitoramento são exibidas na Tabela 2.

Tabela 2 – Concentração Média de Sólidos Totais no Lodo de Alimentação.

Análise de ST	Concentração de ST (kg.m ⁻³)
1	4,584
2	4,974
Concentração Média de ST	4,779

Considerando-se a faixa típica de 0,8 a 1,2% de teor de sólidos secos para lodo produzido e descartado da parte líquida de sistemas de lodos ativados com aeração prolongada (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001), valor que pode ser expresso como sendo de 8 a 12 kgST.m⁻³, o resultado da concentração média de ST do lodo encontra-se abaixo dessa faixa típica, indicando menor teor de sólidos secos presente no lodo de esgoto utilizado para alimentação do WCL em estudo.

A Tabela 3 mostra os dados utilizados e os resultados obtidos para o cálculo da TAS.

Tabela 3 - Resultado da Taxa de Aplicação Superficial de Lodo e Taxa de Aplicação Hidráulica médias do período de monitoramento.

Vazão Média Diária de Lodo ($\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$)	8,45
Área do WCL (m^2)	400
Volume Médio de Lodo Aplicado Mensal (m^3)	165,51
Concentração média de ST ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	4,779
TAS ($\text{kgST} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$)	24
TAH ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$)	21

A TAS resultante de $24 \text{ kgST} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$ para o período de monitoramento do WCL é menor do que aplicado e/ou obtido em outros estudos. Olsson *et al.* (2014) estudaram na Dinamarca um sistema de WCL de mesma área do estudado neste trabalho, 400 m^2 , com uma TAS de $60 \text{ kgST} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$. Também, realizado na Dinamarca e com taxa de $60 \text{ kgST} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$, Nielsen (2007) analisou WCL, porém com áreas maiores, de 1050 m^2 .

Uggetti *et al.* (2009), na Espanha, com áreas menores de WCL, 66 e 25 m^2 , também utilizou-se de taxas maiores do que o obtido neste estudo, TAS de 55 e $125 \text{ kgST} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$, respectivamente. Nos três estudos citados, o lodo de alimentação dos WCL é proveniente de sistemas de tratamento do tipo lodo ativado.

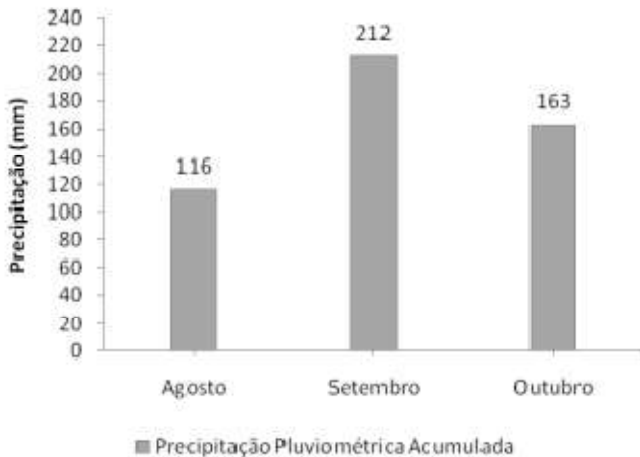
No Brasil, os estudos experimentais encontrados, referem-se a altas taxas de aplicação superficial, como 125 e $250 \text{ kgST} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$ (SUNTTI, 2010) e $300 \text{ kgST} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$ (KÄFER, 2015). Em ambos, tratou-se lodo de esgoto proveniente de tanques sépticos, o qual possui características diferentes do lodo utilizado neste trabalho, como por exemplo, concentração de sólidos totais maior.

4.3 BALANÇO HÍDRICO

4.3.1 Dados de Precipitação Pluviométrica

Os dados de precipitação pluviométrica acumulada nos meses do monitoramento são representados no gráfico da Figura 21.

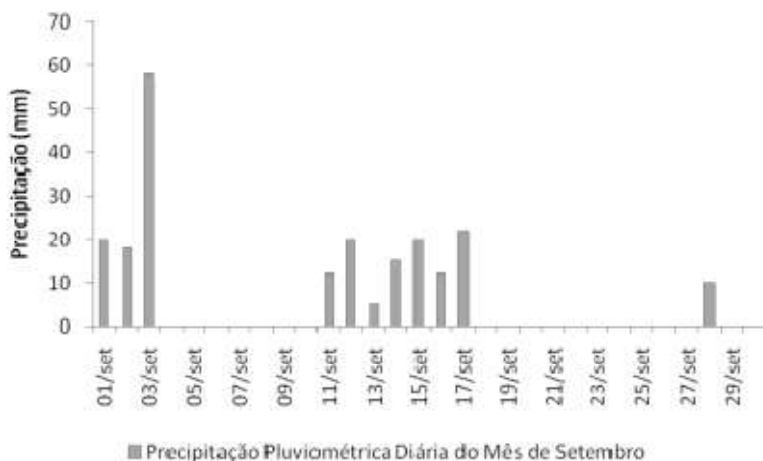
Figura 21 - Gráfico da Precipitação Pluviométrica Acumulada nos meses de monitoramento.



Observa-se pela Figura 21, que o mês de setembro teve a maior precipitação acumulada, em comparação com outros meses de monitoramento. Inclusive, essa precipitação mensal acumulada em setembro, foi superior a precipitação média mensal acumulada da região em que se localiza a ETE, que varia entre 120 a 150 mm (CLIMATE-DATA, 2018).

Na Figura 22 detalha-se a precipitação diária referente ao mês de setembro. Ressalta-se que no intervalo de uma semana (entre 11/09/18 a 17/09/18) houve uma precipitação acumulada de 106 mm, exatamente a metade da quantidade total registrada no mês (212 mm). Tal incidência de chuva pode ter contribuído para o aumento na camada de lodo constatada na visita realizada em 21/09/18.

Figura 22 - Gráfico da Precipitação Pluviométrica Diária do Mês de Setembro.



Para o cálculo do balanço hídrico considerou-se o volume acumulado de precipitação mensal conforme detalhada na Tabela 4.

Tabela 4 - Volume Médio de Precipitação Pluvial no período do monitoramento.

Período	Precipitação Pluviométrica Acumulada Mensal (mm)
07/08/2018 a 07/09/2018	182
08/09/2018 a 08/10/2018	138
Precipitação Pluviométrica Mensal Média (mm)	160
Volume Médio Mensal de Precipitação (m³)	64

4.3.2 Volume de Saída do Líquido Percolado

A vazão média de saída do líquido percolado obtida foi de 12 m³/h. Para os tempos de retirada efetuou-se uma amostra do período, considerando dias inteiros de monitoramento, ao invés de uma análise mensal, pois houve falhas na comunicação da bomba, não registrando o período completo de 24 horas em um dia, em vários dias durante o tempo de desenvolvimento desta pesquisa.

De modo que, utilizando-se do volume médio diário calculou-se o volume para um mês, resultando em 531,30 m³/mês. Porém, esse volume referencia-se ao volume de saída total dos quatro WCLs da ETE.

Então, considerando que nos outros três WCLs o volume médio mensal de precipitação também foi de 64 m³, em cada, e que cerca de 30% do volume total relacionam-se as perdas por evapotranspiração e parcelas de água retida no leito, obteve-se para o WCL em estudo um volume de saída médio mensal de líquido percolado de 179,71 m³.

4.3.3 Balanço Hídrico

A Tabela 5 reúne os volumes de entrada, que compreende o volume aplicado de lodo mais volume de água precipitado no WCL, e o volume de saída de líquido percolado relacionados para obtenção do balanço hídrico do WCL.

Tabela 5 - Balanço Hídrico Médio Mensal do WCL.

Volume Médio Mensal de Lodo Aplicado (m ³)	165,51
Volume Médio Mensal de Precipitação (m ³)	64
Soma dos Volumes de Entrada (m³)	229,51
Volume Médio Mensal de Líquido Percolado (m ³)	179,71
Volume de Saída (m³)	179,71
PERDAS DE ÁGUA (m³.mês⁻¹)	49,80

A partir da Tabela 5 tem-se que o desaguamento médio mensal referente ao volume de líquido percolado que retorna ao sistema de tratamento de esgoto representou 78% do total do volume de entrada no WCL.

As perdas de água no WCL podem ser atribuídas ao processo de evapotranspiração, a camada de água retida no lodo na superfície do leito e, também, a água retida na camada filtrante e na biomassa das macrófitas (KÄFER, 2015). De modo que, no estudo realizado, essas perdas totais de água representaram 22%.

Na pesquisa experimental realizada por Käfer (2015) foram registradas eficiências médias de desaguamento de 19% e 24%, para WCL com macrófitas das espécies *Typha domingensis* e *Cyperus*

papyrus, respectivamente, em sete semanas de alimentação. Os WCL eram submetidos a uma alta TAS, em média $300 \text{ kgST.m}^{-2}\text{ano}^{-1}$.

Em outro estudo registraram-se eficiências de desaguamento de 55% e 35%, para WCL com TAS de 250 e 150 $\text{kgST.m}^{-2}\text{ano}^{-1}$, respectivamente. Ambos os WCL eram plantados com macrófitas da espécie *Zizaniopsis bonariensis*, conhecido popularmente como junco (SUNTTI, 2010).

Como o WCL neste estudo possui diversas espécies de macrófitas, não é possível relacionar a eficiência de desaguamento de uma espécie em específico, somente podendo ser estimado a eficiência do conjunto.

5 CONCLUSÃO

Considerando os objetivos desta pesquisa, durante o período de monitoramento, conclui-se que:

Quanto ao acompanhamento quantitativo, com exceção das macrófitas da espécie *Typha domingensis*, as outras três espécies do estudo apresentaram crescimento positivo. As macrófitas das espécies *Cyperus alternifolius* e *Vetiveria zizanioides* obtiveram aumentos na altura média superior a 50%. Para a espécie *Cyperus giganteus*, houve um aumento na altura média de aproximadamente 15%, porém essas macrófitas já estavam em processo de adaptação no WCL, antes do início do estudo.

Quanto ao acompanhamento qualitativo, com exceção das macrófitas da espécie *Typha*, as outras três espécies do estudo apresentaram brotamento. As espécies *Cyperus alternifolius* e *Cyperus giganteus* variaram do início da pesquisa ao fim, quanto à coloração das plantas, que de verdes passaram a apresentar sinais de ressecamento, incluindo indivíduos caídos e/ou murchos, principalmente, em meados do mês de setembro, quando se observou maior volume de lodo no WCL. A espécie *Vetiveria zizanioides* manteve-se com um bom desenvolvimento do início ao fim da pesquisa, não apresentando sinais de ressecamento em suas folhas, nem indivíduos murchos.

A coleta de dados das macrófitas foi prejudicada com o aumento da camada de lodo verificada em meados de setembro, quando se obteve o maior volume acumulado de lodo aplicado em uma semana.

Quanto ao lodo aplicado, esse apresentou menor teor de sólidos secos em média (0,5%) do que a faixa típica indicada (0,8 a 1,2%). Indicando que o lodo de esgoto aplicado possui composição líquida acentuada. O que se reflete também na baixa taxa de aplicação superficial de lodo média obtida, de $24 \text{ kgST.m}^{-2}\text{.ano}^{-1}$.

O desempenho do WCL em termos de desaguamento situou-se em média em 78%, de modo que a maior parte do volume de entrada retornou a estação de tratamento de esgoto como líquido percolado. Como as espécies de macrófitas estavam plantadas em conjunto no WCL, não pode ser determinado o desempenho individual das espécies.

Por fim, neste estudo não houve tempo suficiente de monitoramento para efetuar comparações de desempenho entre as espécies de macrófitas, porém a adaptação inicial obteve resultados positivos (com exceção da *Typha*), indicando potencial de utilização dessas espécies em WCL.

REFERÊNCIAS

ANDREOLI, C. V.; PINTO, M. A. T. Introdução. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. p. XXI-XXIV.

ALEM SOBRINHO, P. Tratamento de esgoto e geração de lodo. In: TSUTIYA, M. T. *et al* (Ed.). **Biossólidos na Agricultura**. 2. ed. São Paulo: ABES/SP, 2002. Cap. 2. p. 7-40.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. A disposição do lodo de esgoto em solo agrícola. In: BETTIOL, C.; CAMARGO, O. (Ed.). **Lodo de Esgoto: Impactos Ambientais na Agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. Cap. 2. p. 25-36.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2016**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2018. 220 p.

BRASIL. **Resolução nº 375**, de 29 de agosto de 2006. Brasília, DF, 2006.

BRIX, H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? **Wat. Sci. Tech.**, v. 35, n. 5, p. 11-17, 1997.

CLIMATE-DATA. **Clima Florianópolis: Temperaturas e Precipitações médias**. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/santa-catarina/florianopolis-1235/>>. Acesso em: 22 out. 2018.

DE MAESENEER, J. L. Constructed wetlands for sludge dewatering. **Wat. Sci. Tech.**, v. 35, n.º 5, p. 279-285, 1997.

DOTRO, G. *et al*. **Treatment Wetlands**. Londres: IWA Publishing, 2017. 154 p.

FERNANDES, F.; SOUZA, S. G. Estabilização de lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. Cap. 2. p. 29-55.

GONÇALVES, R.F. *et al.* Desidratação de lodo de esgotos. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final**. Rio de Janeiro: Ri-Ma, ABES, 2001. Cap. 3. p. 57-86.

GONÇALVES, R.F.; LUDUVICE, M.; VON SPERLING, M. Sludge thickening and dewatering. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.). **Sludge Treatment and Disposal**. Londres: IWA Publishing, 2007. Cap. 5. p. 76-119.

HOFFMANN, H. *et al.* In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável, 2004, Florianópolis. **Tratamento e valorização do lodo biológico de estações de tratamento de esgoto sanitário por canteiros de mineralização: uma alternativa ecológica de baixo custo**. Florianópolis: ICTR, 2004. p. 1898 - 1906.

KÄFER, S. C. **Tratamento de lodo anaeróbio em wetlands construídos operados em alta taxa e com a recirculação de líquido percolado**. 2015. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

KENGNE, I. M. *et al.* Effects of faecal sludge application on growth characteristics and chemical composition of *Echinochloa pyramidalis*. Hitch and Chase and *Cyperus papyrus* L. **Ecological Engineering**, Camarões, v. 34, p. 233-242, 2008.

KOOTTATEP, T. *et al.* Treatment of septage in constructed wetlands in tropical climate- lessons learnt after seven years of operation. **Water Science and Technology**, v. 51, n. 9, p. 199-126, 2005.

LUDUVICE, M. Sludge stabilisation. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Ed.). **Sludge Treatment and Disposal**. Londres: IWA Publishing, 2007. Cap. 4. p. 48-75.

MAGRI, M. E. *et al.* In: Internacional Conference on Wetlands Systems for Water Pollution Control, 12., 2010, Veneza. **Performace of different macrophytes species in constructed wetland systems for**

anaerobic sludge dewatering, experiences from Southern Brazil. Disponível

em:<https://www.researchgate.net/publication/280091818_Performance_of_different_macrophytes_species_in_constructed_wetland_systems_for_anaerobic_sludge_dewatering_experiences_from_Southern_Brazil>
Acesso em: 15 set 2018.

MAGRI, M. E. *et al.* Constructed wetlands for sludge dewatering with high solids loading rate and effluent recirculation: Characteristics of effluent produced and accumulated sludge. **Ecological Engineering**, v. 95, p.316-323, 2016.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O.; MELO V. P. O uso agrícola do biossólido e as propriedades do solo. In: TSUTIYA, M. T. *et al* (Ed.). **Biossólidos na Agricultura**. 2. ed. São Paulo: ABES/SP, 2002. Cap. 11. p. 289-363.

MIKI, M. K.; ANDRIGUETI, E. J.; ALEM SOBRINHO, P. Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgoto. In: TSUTIYA, M. T. *et al* (Ed.). **Biossólidos na Agricultura**. 2. ed. São Paulo: ABES/SP, 2002. Cap. 3. p. 41-87.

NIELSEN, S. Sludge drying reed beds. **Water Science and Technology**, v. 48, n. 5, p. 101-109, 2003.

NIELSEN, S. Sludge treatment and drying reed bed systems. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 7, n. 3-4, p. 223-234, 2007.

NIELSEN, S; BRUUN, E. W. Sludge quality after 10–20 years of treatment in reed bed systems. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 17, p. 12885-12891, 2015.

OLSSON, L. *et al.* Emissions of CO₂ and CH₄ from sludge treatment reed beds depend on system management and sludge loading. **Environmental Management**, v. 141, p. 51-60, 2014.

PEDROZA, E.C.L. *et al.* Aplicação de leitos para secagem de lodo gerado em estações de tratamento de esgotos. In: ANDREOLI, C. V. *et al.* (Coord.). **Biossólidos**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. Cap. 5. p. 109-158.

PINTO, M.T. Pathogen removal from sludge. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Ed.). **Sludge Treatment and Disposal**. Londres: IWA Publishing, 2007. Cap. 6. p. 120-148.

SILVA, S. M. C. P. *et al.* Main Contaminants in Sludge. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Ed.). **Sludge Treatment and Disposal**. Londres: IWA Publishing, 2007. Cap. 3. p. 31-47.

SUNTTI, C. **Desaguamento de lodo de tanque séptico em filtros plantados com macrófitas**. 2010. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

TSUTIYA, M. T. Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTIYA, M. T. *et al.* (Ed.). **Biossólidos na Agricultura**. 2. ed. São Paulo: ABES, 2002. Cap. 4. p. 89-131.

UGGETTI, E. *et al.* Sludge dewatering and stabilization in drying reed beds: characterization of three full-scale systems in Catalonia, Spain. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 17, p. 3882-3890, 2009.

UGGETTI, E. *et al.* Sludge treatment wetlands: a review on the state of the art. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 9, p. 2905-2912, 2010.

VAN HAANDEL, A.; ALEM SOBRINHO, P. Produção, composição e constituição do lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Biossólidos: Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. Cap. 2. p. 7-48.

VAN HAANDEL, A.; CALVACANTI, P. F. F. Geração e composição de lodo em sistemas de tratamento de esgotos sanitários. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. Cap. 1. p. 3-27.

VON SPERLING, M. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1996. 243 p.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. Cap. 2. p. 17-67.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Sludge characteristics and production. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.). **Sludge Treatment and Disposal**. Londres: IWA Publishing, 2007. Cap. 2. p. 4-30.