

Trabalho Conclusão Curso

Iáscara Anna Valente Mattes

**ESTUDO DOS PARÂMETROS DE
OPERAÇÃO E EFICIÊNCIA DE
WETLANDS CONSTRUÍDOS PARA
TRATAMENTO DE LODO DE ESGOTO
SANTÁRIO**

Florianópolis
2017



Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico - CTC
Engenharia Sanitária e Ambiental

Iáscara Anna Valente Mattes

**Estudo dos Parâmetros de Operação e Eficiência de Wetlands
Construídos para Tratamento de Lodo de Esgoto Sanitário**

Trabalho apresentado à Universidade
Federal de Santa Catarina para a
conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental.
Orientadora: Dra. Maria Elisa Magri

Florianópolis
2017

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

Mattes, Iáscara Anna Valente
Estudo dos Parâmetros de Operação e Eficiência de
Wetlands Construídos para Tratamento de Lodo de
Esgoto Sanitário / Iáscara Anna Valente Mattes ;
orientadora, Dr^a Maria Elisa Magri, 2017.
70 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Wetlands
Construídos. 3. Tratamento de Lodo de Esgoto
Sanitário. 4. Lodo de Caminhões Limpa-Fossa. 5.
Lodo de Reator RBS. I. Magri, Dr^a Maria Elisa. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Márcara Anna Valente Mattes

ESTUDO DOS PARÂMETROS DE OPERAÇÃO E EFICIÊNCIA DE WETLANDS
CONSTRUÍDOS PARA TRATAMENTO DE LODO DE ESGOTO SANITÁRIO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheira Sanitarista e Ambiental e aprovado pela banca examinadora.

Florianópolis, 29 de junho de 2017.

Banca Examinadora:


Prof. Dr^a. Maria Elisa Magalhães
Orientador


Dr^a. Catiane Pelissari
Membro da Banca


Eng^a. Ms. Mayara Oliveira dos Santos
Membro da Banca

Where your talents
and the needs of the world cross,
there lies your vocation.
Aristotle

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à efetivação deste trabalho à Prof. Maria Elisa, por ter compartilhado seu vasto conhecimento e experiência sobre o assunto. Agradeço também à mestranda Camila, por ter compartilhado sua pesquisa comigo e ter me auxiliado em todo o trabalho. Me sinto muito satisfeita ter tido a oportunidade de aprender sobre uma forma de tratamento alternativo de esgoto, que não havia sido aprofundado durante a graduação e que traz tantos benefícios ambientais.

Esta parte reservo à todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram nessa longa e complexa jornada da graduação. Agradeço à todos os colegas de curso, que em algum momento compartilharam momentos de intenso estudo na B.U. e de noitadas e mais noitadas dimensionando os projetos das matérias finais.

Jamais conseguirei compreender aimensidão da sorte que tive em meu caminho se cruzar com o da minha turma ♥10.2♥, é mágico o quanto vocês conseguem tornar toda dificuldade em uma superação e toda festa nos melhores momentos da vida. Muito obrigada, Boteco, não tenho como explicar a gratidão que sinto por fazer (ser) parte de um grupo tão único e formado por pessoas tão especiais.

Agradeço especialmente à Pri e Ana, pela amizade sincera e por não terem me deixado nunca na mão. Conseguiram me ‘segurar’ mesmo em cidades separadas, são pessoas que eu pude contar, com todo meu coração, até o último minuto da faculdade. Obrigada Ju, parceria que surgiu do Cálculo e se manteve por intensos 6 anos de muita festa, choro e amor. Agradeço ao Bruno, por ser um exemplo de amigo, aluno e profissional, sempre me ensinando a fazer as tarefas da forma mais correta e perfeccionista possível. Agradeço profundamente à Nina, Nati e Xu, por todo apoio e carinho, sem vocês com certeza não teria chegado até o fim.

Os estágios na UFSC me fizeram acreditar que bons profissionais realmente podem fazer a diferença em qualquer instituição, muito obrigada à Renata Pacheco, Sara Meireles e Cristian Mazzola, por serem líderes tão interessados e responsáveis, vocês são meus exemplos de profissionais.

Agradeço ao Icaro e à Mila, por serem meus irmãos mais velhos, por acompanharem **todas** as minhas conquistas e me pegarem pela mão, me fazendo ter coragem para enfrentar qualquer dificuldade. Por fim, mas não menos importante, agradeço imensamente à todo apoio, suporte, muita paciência, carinho e força dos meus pais. Jamais conseguirei agradecer o bastante. Obrigada papai, rose, mamãe e lu.

RESUMO

No Brasil, onde o processo de saneamento básico ainda é insipiente, poucas cidades têm um sistema holístico e eficiente para esse fim e na maioria delas, as redes públicas de esgoto não alcançam locais mais periféricos. A problemática perpetua-se nas Estações de Tratamento de Esgoto que, quando existentes, nem sempre têm estrutura para atender ao aumento de demanda conforme crescimento populacional. Além da dificuldade encontrada no gerenciamento do esgoto, ainda existe o desafio em realizar a disposição ambientalmente adequada do grande volume de lodo residual gerado diariamente nas Estações de Tratamento de Esgoto, de forma a proporcionar a preservação ambiental e que seja economicamente viável. Ao se construir sistemas menores, o controle de qualidade do efluente e a manutenção da estrutura tornam-se mais simples e dinâmicos, fatores os quais trazem aumento da eficiência do tratamento. O presente estudo mostra um sistema de tratamento descentralizado de Wetlands Construídos para tratamento de lodo proveniente de caminhões limpa-fossa e de reator aeróbio em bateladas sequenciais (RBS). Por meio de análises físico-químicas, caracterizou-se o lodo de alimentação, o lodo de superfície acumulado e o líquido percolado do sistema e os resultados do estudo apresentaram eficiências de remoção de poluentes maiores que 80%, apesar do grande volume de lodo de alimentação aplicado diariamente. Além disso, baseado nas análises experimentais de parâmetros de qualidade e no acompanhamento das rotinas operacionais em campo, determinou-se uma Taxa de Aplicação Superficial do lodo baixa nos Wetlands e um grande volume de perda de água (60%), o que indica um bom processo de desaguamento. Dessa forma, pretendeu-se mostrar que sistemas de Wetlands Construídos para Tratamento de Lodo apresentam grandes benefícios comparados ao uso de aterros sanitários para disposição do lodo, principalmente pelo fato de gerar produtos que atendem às exigências da Resolução CONAMA nº375/2006, permitindo assim, a aplicação agrícola do lodo e seus produtos derivados.

Palavras-chave: Wetlands Construídos, Lodo, Tratamento Descentralizado, Parâmetros Operacionais.

ABSTRACT

Basic Sanitation in Brazil is a process in development so only a few cities have a holistic and efficient system of sewerage and sludge treatment and, at most of them, the public sewerage cannot reach more peripheral places. The problem is extended to the Wastewater Treatment Plants, which usually do not have the structure to attend the increased demand related to population growth. In addition to the difficulty found in the sewage management, there is still the challenge of accomplishing the correct disposal of the large volume of sewage sludge generated daily at Wastewater Treatment Plants in order to preserve the environment and to be economically viable. Building smaller systems, the quality control of the effluent and the maintenance of the structure became simpler and dynamic, factors that bring an increase on the treatment efficiency. This study presents the operating parameters of Constructed Wetlands for residual sludge treatment to treat the residual sludge from septic tank trucks and from Sequencing Batch Reactor (SBR). Through the physical-chemical analysis, the feed sludge, accumulated surface sludge, and percolated liquid of the system are characterized. The results of the study showed that the Plant achieves efficiencies greater than 80% in the removal of sludge pollutant loads, despite the large volume of feed sludge applied daily. Based on experimental analysis of quality parameters and monitoring of the operational routines in field, it was determined a low Sludge Loading Rate (SLR) applied in the Wetlands and a large volume of water loss (60%), which indicates a good dewatering process. Thus, it was intended to show that Constructed Wetlands built for residual sludge treatment presents great benefits compared to the use of landfills for sludge disposal, mainly due to the fact of generating products that attend to the requirements of CONAMA Resolution n° 375/2006, allowing an agricultural application of residual sludge and its products.

Keywords: Constructed Wetlands, Residual Sludge, Decentralized Treatment Plants, Operating Parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Funcionamento geral de um Tanque Séptico.....	26
Figura 2 – WC de fluxo vertical.....	31
Figura 3 – WC de fluxo horizontal.....	31
Figura 4 – Esquema do layout de WCL	32
Figura 5 – Transformação do Nitrogênio em processo biológico	34
Figura 6 – Localização Geral do Sistema de WCL	37
Figura 7 – Localização do WCL e ETE anexa ao Sistema.....	38
Figura 8 – Registro do Sistema com cada WCL indicado.....	39
Figura 9 – Representação das Unidades de WCL	41
Figura 10 – Tubos para leitura dos parâmetros (10/03/17)	44
Figura 11 – Variação da porcentagem média de ST para cada tipo de amostra	53
Figura 12 – Comparação entre as concentrações de ST (g/kg) entre os WCL1 e WCL2 durante as coletas	54
Figura 13 – Gráfico <i>Box plot</i> com médias, erro padrão (EP), desvio padrão (DP) das concentrações de $P-PO_4^{-3}$	56
Figura 14 – Gráfico <i>Box plot</i> com médias, erro padrão (EP), desvio padrão (DP) das concentrações de $N-NH_4^+$	57
Figura 15 – Comparação do parâmetro pH nas diferentes amostras	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Origem dos principais subprodutos sólidos gerados no tratamento de esgoto.....	28
Quadro 2 – Mecanismos de Remoção de poluentes em um sistema de WCL.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Registro de caminhões limpa-fossa que chegaram ao sistema de WCL entre abril de 2016 e maio de 2017.....	46
Tabela 2 – Resultado para o Cálculo da Taxa de Aplicação Anual de Lodo de Alimentação.	48
Tabela 3 – Comparação dos parâmetros dos lodos de alimentação do sistema.....	49
Tabela 4 – Resultados de pesquisas para lodo de caminhões limpa-fossa	49
Tabela 5 – Características Típicas de Sólidos no Esgoto Bruto	50
Tabela 6 – Média diária do volume de percolado gerado.....	51
Tabela 7 – Apresentação dos resultados para as análises de LP	51
Tabela 8 – Apresentação dos resultados para as análises dos WCL.....	52
Tabela 9 – Relação entre Sólidos Voláteis e Sólidos Totais para as amostras de Lodo de Superfície e Líquido Percolado	55
Tabela 10 – Apresentação da eficiência de redução da Carga dos parâmetros	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEA	Agência Européia do Ambiente
APHA	<i>American Public Health Association</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxigênio em 5 dias
DP	Desvio Padrão da média
DQO	Demanda Química de Oxigênio
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiental
EP	Erro Padrão
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FUNASA	Fundação Nacional da Saúde
GESAD	Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IN	Instrução Normativa
LIMA	Laboratório Integrado de Meio Ambiente
LP	Líquido Percolado
L1	Lodo dos Caminhões Limpa-Fossa
L2	Lodo do Reator RBS
NBR	Norma Brasileira
N-NH ₄ ⁺	Nitrogênio Amoniacal
P	Fósforo
P-PO ₄ ⁻³	Fósforo Ortofosfatado dissolvido reativo
pH	Potencial Hidrogênionico
PNAD	Programa Nacional por Amostra de Domicílio
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
RBS	Reator de Batelada Sequencial
SF	Sólidos Fixos
ST	Sólidos Totais

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS (Cont.)

SV	Sólidos Voláteis
TAS	Taxa de Aplicação Superficial
WC	Wetlands Construídos
WCL	Wetlands Construídos para Tratamento de Lodo
WCFH	Wetlands Construídos de Fluxo Horizontal
WCFV	Wetlands Construídos de Fluxo Vertical
WCL1	Wetlands Construídos para Tratamento de Lodo 1
WCL2	Wetlands Construídos para Tratamento de Lodo 2
WCL P1	Wetlands Construídos para Tratamento de Lodo Paralisado 1
WCL P2	Wetlands Construídos para Tratamento de Lodo Paralisado 2

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	21
1.1.1	Objetivo Geral.....	21
1.1.2	Objetivos Específicos	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	SANEAMENTO BÁSICO	23
2.2	TRATAMENTO DE ESGOTO	24
2.3	TANQUES SÉPTICOS	25
2.4	LODO DE TANQUE SÉPTICO.....	26
2.5	LODO DE REATOR RBS.....	27
2.6	ATERROS SANITÁRIOS – DESTINAÇÃO DO LODO.....	29
2.7	WETLANDS CONSTRUÍDOS.....	30
2.8	WETLANDS CONSTRUÍDOS PARA TRATAMENTO DE LODO (WCL).....	32
2.9	REMOÇÃO DE NITROGÊNIO E FÓSFORO	33
2.10	LEGISLAÇÃO VIGENTE	36
3	METODOLOGIA	37
3.1	LOCAL DO ESTUDO.....	37
3.2	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA	37
3.3	PROCEDIMENTOS DE CAMPO E AMOSTRAGEM	40
3.4	LOCAL DAS ANÁLISES LABORATORIAIS	42
3.5	PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	42
3.5.1	pH.....	42
3.5.2	Fósforo Ortofosfato ($P-PO_4^{-3}$)	43
3.5.3	Nitrogênio Amoniacal ($N-NH_4^+$)	43
3.5.4	Série de Sólidos	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS	45

4.1.1	Volume de Lodo de Alimentação aplicado no Sistema	45
	Lodo dos Caminhões Limpa-Fossa	45
	Lodo do Reator RBS	47
4.1.2	Taxa de Aplicação Superficial de Lodo	47
4.2	AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO	48
4.2.1	Caracterização físico-química do Lodo de Alimentação	48
4.2.2	Caracterização do Líquido Percolado.....	50
4.2.3	Caracterização do lodo acumulado nos WCL	52
4.2.4	Análise da acidez do Sistema	57
4.2.5	Remoção da Carga de Poluentes	59
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	61
5.1	CONCLUSÕES	61
5.2	SUGESTÕES PARA A OPERAÇÃO E MONITORAMENTO DE WCL	62
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de sistemas descentralizados de tratamento de esgoto originou-se a partir da necessidade em destinar corretamente os efluentes domésticos de locais onde não existe o serviço público de rede e tratamento de esgoto e que, em muitas dessas situações, o efluente acabava sendo destinado a coletores de drenagem pluvial, causando poluição nos corpos d'água. No Brasil, onde o processo de saneamento básico está incipiente, poucas cidades têm um sistema holístico e eficiente de coleta e tratamento de esgoto e na maioria delas, as redes públicas não alcançam locais mais periféricos.

A problemática se perpetua nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) que, quando existentes, não têm estrutura para atender ao aumento de demanda conforme crescimento populacional. Além da dificuldade encontrada no gerenciamento do esgoto, ainda existe o desafio em realizar a disposição do grande volume de lodo residual gerado diariamente nas Estações de Tratamento de Esgoto, de forma a proporcionar a preservação ambiental e que seja economicamente benéfica. À medida que as concessionárias responsáveis pelo serviço de água e esgoto das cidades tentam se adequar às novas ocupações territoriais urbanas, o crescimento populacional ocorre de forma exponencial e, dessa forma, é necessário o desenvolvimento de novas alternativas para tratar o esgoto doméstico e para destinar o alto volume de lodo gerado nas ETE's.

O desenvolvimento de sistemas alternativos para tratamento de lodo residual das Estações é motivado pelo grande potencial poluidor deste material excedente, caso o mesmo não seja disposto e tratado de forma técnica adequada após ser retirado do sistema. O volume desse lodo gerado naturalmente de processos de tratamento aeróbio e anaeróbio e a conseqüente necessidade de tratamento do mesmo crescem à medida que mais serviços de coleta e tratamento de esgoto são operados para atender ao aumento de contribuição nas cidades.

Nesse contexto, pode-se considerar que a necessidade em tratar o grande volume de lodo residual das ETE's é uma demanda atual, visto que o volume de lodo gerado é diretamente relacionado com o número de pessoas atendidas pelo serviço de saneamento público. Diante disso, pode-se concluir que a tendência futura é o crescente aumento da geração de lodo residual, portanto, é primordial que os órgãos responsáveis comecem a buscar alternativas que possam se encaixar com essa progressiva necessidade.

Os processos que englobam a disposição final de 90% do lodo produzido no mundo são: incineração, disposição em aterros e uso agrícola (IWAKI, G., 2017). No Brasil, o método mais comum é a disposição do lodo residual em aterros sanitários, o qual já enfrenta muitos desafios quanto ao recebimento de Resíduos Sólidos Urbanos devido à grande área necessária para a concepção do sistema e a incerteza sobre o tempo para revitalização do local após o esgotamento da sua vida útil.

Para realizar a disposição e tratamento do lodo residual das Estações, há uma vertente de tratamento descentralizado que visa diminuir o volume de lodo e remover os poluentes do material sólido e líquido percolado, gerando produtos com potencial de uso agrícola (STEFANAKIS et al., 2014). Ao construir sistemas específicos para o tratamento de lodo, torna-se possível realizar sua concepção em áreas menores e mais próxima das ETE's. Além disso, o controle de qualidade do efluente, a manutenção da estrutura e a logística de transporte do lodo tornam-se mais simples e dinâmicos, fatores os quais trazem aumento na eficiência do tratamento e o tornam de menor custo operacional.

Nesse contexto, os sistemas de Wetlands Construídos para Tratamento de Lodo (WCL) são usados para tratar e destinar o lodo do esgoto doméstico. Estes sistemas, em termos de desidratação de lodo, são capazes de atingir eficiências semelhantes às das tecnologias convencionais de desaguamento (leitos de secagem, centrifugação ou filtro prensa) de maneira mais sustentável (UGGETTI et al., 2011), apresentando também bons resultados na eficiência de remoção de poluentes. Os WCL se apresentam como um filtro natural, onde a parte filtrante é formada por diferentes camadas (pedra, areia e cascalho) e a parte superficial por plantas do tipo macrófitas, as quais criam uma estrutura porosa através dos seus rizomas e raízes para conduzir o processo de tratamento. Embora a maior parte dos Wetlands Construídos existentes tenha sido projetada para o tratamento de efluentes líquidos, o presente trabalho aborda a pesquisa deste sistema para tratamento de lodo residual de ETE e proveniente de tanques sépticos, o qual apresenta diferentes características quando comparado ao esgoto sanitário, como sua densidade e porcentagem de água, sendo a principal delas a grande concentração de sólidos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar as condições de funcionamento e a eficiência de tratamento de um sistema de Wetlands Construídos para tratamento de lodo (WCL) proveniente de Caminhões Limpa-Fossa e Reator Aeróbio em Batelada Sequencial (RBS).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar os principais parâmetros operacionais aplicados em um sistema de Wetlands Construídos para tratamento de lodo em escala real;
- Analisar a eficiência de remoção de poluentes físico-químicos em um sistema de WCL implantado em escala real.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SANEAMENTO BÁSICO

Com o advento da Lei nº 11.445/07, atestou-se o conceito de saneamento básico como o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem de águas pluviais urbanas. A lei definiu também as competências quanto à coordenação e atuação dos diversos agentes envolvidos no planejamento e execução da política federal de saneamento básico no País (BRASIL, Ministério do Meio Ambiente).

Segundo o IBGE, considerando o Orçamento Familiar, o gasto do brasileiro com tarifas dos serviços de água e esgoto comparado com outros serviços é muito baixo (15%). Depende-se muito mais recursos com os serviços de energia (38%) e telefonia fixa e celular (35%), que possuem infraestruturas bem menos complexas, do que com serviços de abastecimento de água e de esgotamento sanitário. É importante observar que mesmo com o custo muito mais baixo do que os outros serviços, a população, que não tem a cultura da importância do saneamento básico, tem uma sensação de que os serviços de água e esgoto são muito caros (OLIVEIRA FILHO, 2016).

O Manual de Saneamento (FUNASA, 2006) apresenta o conceito de Saneamento Ambiental como o conjunto de ações socioeconômicas que têm por objetivo alcançar Salubridade Ambiental, por meio de abastecimento de água potável, coleta e disposição sanitária de resíduos sólidos, líquidos e gasosos, promoção da disciplina sanitária de uso do solo, drenagem urbana, controle de doenças transmissíveis e demais serviços e obras especializadas, com a finalidade de proteger e melhorar as condições de vida urbana e rural.

A partir das definições citadas, pode-se caracterizar saneamento como um conjunto de ações que assegura a saúde do homem através de ações ligadas aos principais pilares: abastecimento e tratamento de água, gerenciamento dos resíduos sólidos, drenagem urbana e esgotamento sanitário. Nesse contexto, a gestão do esgoto sanitário deve ser adequada periodicamente com a expansão das cidades para que atenda ao aumento das demandas. Assim, se faz necessária uma breve revisão deste conceito maior para melhor compreensão da problemática do esgotamento sanitário no país, atualmente um dos setores que mais carecem de desenvolvimento. O esgotamento sanitário conta com

basicamente duas variantes: o sistema individual ou estático e o sistema coletivo ou dinâmico (VON SPERLING, 2005).

2.2 TRATAMENTO DE ESGOTO

O tratamento do esgoto sanitário visa diminuir a concentração dos poluentes existentes no efluente para que seja possível o seu lançamento no corpo d'água. De acordo com as características do efluente, escolhe-se o tipo de tratamento, o qual pode ser dentro de um sistema centralizado ou descentralizado.

Tradicionalmente, a água residuária (incluindo os sólidos) tem sido coletada por condutos de esgoto com grandes diâmetros e transportada por longas distâncias para um sistema mecânico de tratamento “centralizado” (WHITE, 2005). De acordo com Libralato, Ghirardini e Avezzu (2012), cerca de 80 a 90% dos custos de capital de implantação do sistema centralizado estão relacionados com a rede coletora.

O sistema de tratamento descentralizado é definido como a coleta, tratamento e disposição/reuso das águas residuárias no próprio local ou próximo ao ponto da sua geração (TCHOBANOGLIOUS; BURTON, 1995). Esses sistemas são aplicados em áreas menores, onde o dimensionamento e a operação têm características mais específicas para determinada região. Além disso, possuem baixo custo de implantação e operação, manutenção simplificada e boa eficiência de funcionamento.

Globalmente, é estimado que 82% da população urbana usa atualmente instalações de saneamento melhoradas, chamadas de tecnologias *on site* (latrinas, fossas rudimentares, tanques sépticos, sanitários secos, etc.), comparado com 51% da população rural. (WHO; UNICEF, 2015). No contexto nacional, o IBGE (2012) estima que nas zonas rurais, apenas 5,2% dos domicílios estão ligados à rede de coleta de esgotos e 28,3% utilizam tanque séptico ligado ou não à rede como solução para o tratamento do esgoto. Os demais domicílios depositam os dejetos em fossas rudimentares (45,3%), possuem outras soluções (7,7%) ou lançam em cursos d'água ou diretamente no solo a céu aberto (13,6%). Ou seja, em zonas rurais, apenas cerca de 30% da população trata e destina o esgoto sanitário de forma ambientalmente adequada.

Além da situação encontrada na zona rural, outra problemática é vivenciada nas áreas periféricas das cidades, onde a rede coletora pública de esgoto não chega. Este cenário institui igualmente grande preocupação, pois a expansão e o desenvolvimento de grandes sistemas

de coleta e tratamento de esgoto não acompanham o ritmo da rápida expansão urbana.

Sistemas centralizados de esgoto custam cinco vezes mais do que sistemas de tecnologia *on site*, como tanques sépticos e latrinas (DODANE et al., 2012). Sendo assim, o caminho seria o incentivo e orientação por parte dos Órgãos Públicos responsáveis na aplicação de tecnologias de sistemas descentralizados, de forma que tivesse maior área de abrangência e menor custo para aplicação.

2.3 TANQUES SÉPTICOS

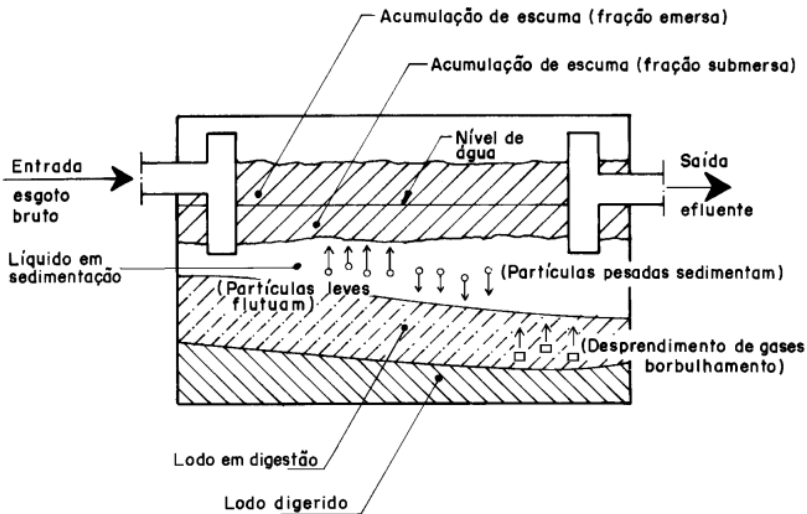
Por ser uma tecnologia com baixo custo e que apresenta boa eficiência, os tanques sépticos são muito aplicados em áreas urbanas com a ausência de rede pública de coleta de esgoto. Os tanques sépticos são sistemas de simples construção, econômicos, praticamente não requerem manutenção – salvo uma limpeza periódica a cada dois ou cinco anos – e, por isso mesmo, têm sido muito usados em todo mundo (JORDÃO; ALÉM SOBRINHO, 2009). O primeiro tanque séptico foi desenvolvido pelo francês Jean Louis Mouras em 1872, mas em 1896, o inglês Donald Cameron patenteou um decanto-digestor e o nomeou de Tanque Séptico, possivelmente em função da palavra *sepsis*, que exprime decomposição pela atividade microbiana (ANDRADE NETO et al., 1997). A aplicação pioneira do tanque séptico no Brasil se deu a partir da construção de um grande tanque, de uso coletivo, na cidade de Campinas (SP) em 1982, visando o tratamento de esgotos urbanos. No entanto, os tanques sépticos começaram a ser difundidos amplamente a partir da década de 30 (HARTMANN et al., 2009).

Tanques sépticos são reatores biológicos anaeróbios onde microorganismos participam ativamente na digestão da matéria orgânica com formação de biogás (CH_4 e CO_2). Essa tecnologia não apresenta uma eficiência muito alta para remoção de DBO_5 , porém, produzem um efluente que pode ir para pós-tratamento e assim, remover a matéria orgânica dissolvida. Entre suas funções, destaca-se a separação gravitacional da espuma e dos sólidos em relação ao líquido efluente, os sólidos constituem o lodo. Além disso, também são responsáveis por fazerem a digestão anaeróbia do lodo e posteriormente, seu armazenamento. Sua eficiência de remoção de DBO é de 30-55%, de sólidos suspensos de 20-90% e óleos/graxas de 70-90% (BELLI FILHO et al., 2004).

No Brasil, o projeto, a construção e a operação são regulamentados pela NBR 7229 de 1993 (ABNT-NBR7229, 1993) a

qual orienta a importância de considerar o Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) entre 6 e 8 horas para o dimensionamento do volume do tanque. Além disso, é importante que não ocorra grande acúmulo de lodo para garantir o bom funcionamento do reator, porém, após a limpeza deve-se deixar 10% do volume em lodo de fundo para que o sistema continue com a mesma eficiência. A remoção do lodo pode ocorrer por pressão hidrostática ou bombeamento por caminhão limpafossa. Na Figura 1 apresenta-se o esquema das partes internas que constituem um Tanque Séptico.

Figura 1 – Funcionamento geral de um Tanque Séptico



Fonte:

ABNT – NBR7229, 1993.

2.4 LODO DE TANQUE SÉPTICO

O lodo séptico é uma mistura anaeróbia bastante variável e com odor desagradável (KANG; SMITH, 1981). Em função de sua umidade, apresenta limitações para ser tratado como resíduo sólido. Desta maneira, uma etapa comum a diversas alternativas de tratamento consiste na separação preliminar entre as frações sólidas e líquidas do lodo séptico, o desaguamento. O lodo que é removido dos Tanques Sépticos apresenta grande potencial poluidor devido as suas características variadas, como quantidade de material orgânico, patogenicidade e atração de vetores. Para tanto, aconselha-se o

tratamento do lodo gerado, de forma a minimizar os seus efeitos. Este tratamento pode ocorrer de forma isolada: como o uso de biodigestores anaeróbicos, lagoas, *Wetlands*, estabilização alcalina (calagem), secagem com calor e valas de infiltração e, por fim, a destinação em aterros (CAMPOS et al., 2009).

O destino final do lodo proveniente das fossas representa um grave problema que ainda não foi adequadamente equacionado. Hartmann et al. (2009) estimam que a produção de lodo séptico úmido no Brasil é cerca de 79.000 m³/dia. Além da problemática do seu grande volume gerado, torna-se um passivo pela grande resistência de praticamente todos os envolvidos em assumir a responsabilidade de sua gestão. Quando os tanques sépticos enchem, eles são, geralmente, limpos por um caminhão limpa-fossa que lançam esse lodo em aterros, ETE de outros municípios ou simplesmente, este lodo é liberado no ambiente devido à falta de controle sobre os caminhões e limpeza dos tanques sépticos (LUPATINI et al., 2009).

Em alguns locais, as próprias empresas que coletam o lodo das fossas são responsáveis pelo seu tratamento e, em outros, as prefeituras. Esta indefinição tem sua origem no fato de que o tratamento do lodo apresenta custos e não há uma definição de quem seria responsável pela operação e pelo pagamento destes custos (ANDREOLI et al., 2009).

2.5 LODO DE REATOR RBS

A destinação do lodo residual que é gerado nas ETE's é um grande problema ambiental para as empresas de saneamento, públicas ou privadas (METCALF, 2002). Embora esse resíduo represente em média 1% a 2% do volume total do esgoto tratado, seu gerenciamento é bastante complexo e demanda custos elevados (ANDREOLI, 1997 citado por MAZIVIERO, 2011).

O princípio do processo de lodos ativados com operação intermitente consiste na incorporação de todas as unidades, processos e operações normalmente associados ao tratamento tradicional de lodos ativados, quais sejam, decantação primária, oxidação biológica e decantação secundária, em um único tanque. Utilizando tanque único, esses processos e operações passam a ser simplesmente sequências no tempo, e não unidades separadas, como ocorre nos processos convencionais de fluxo contínuo (VON SPERLING, 2002). O Quadro 1 expõe os tipos de resíduos sólidos gerados em cada etapa de uma ETE,

assim como, o tipo de lodo proveniente de Lodos Ativados, correspondente ao RBS.

Quadro 1 – Origem dos principais subprodutos sólidos gerados no tratamento de esgoto.

Subproduto Sólido Gerado	Origem do Resíduo na ETE
Sólidos Grosseiros	Grade
Areia	Desarenador
Escuma	Desarenador, decantador primário, decantador secundário, reator anaeróbio e lagoa de estabilização
Lodo Primário	Tanque séptico e decantador primário
Lodo Secundário	Decantador secundário
Lodo Biológico Aeróbio (não estabilizado)	Lodos ativados convencional e reatores aeróbios com biofiltro (alta carga)
Lodo Biológico Aeróbio (estabilizado)	Lodos ativados – aeração prolongada e reatores aeróbios com biofilme (baixa carga)
Lodo Biológico Anaeróbio (estabilizado)	Lagoas de estabilização, Reatores UASB e Filtros anaeróbios

Fonte: Adaptado de Metcalf e Eddy, 2002.

Em geral, há pouca geração de lodo primário e secundário nos sistemas de lodos ativados, porém, o lodo residual que precisa ser removido é muito concentrado em nutrientes devido à periódica recirculação de lodo interno entre o decantador e o reator, fator que caracteriza esse sistema com alta eficiência na remoção de poluentes. Von Sperling (2002) explica que essa recirculação faz com que a unidade de biomassa por volume de reator aumente em relação à matéria orgânica por volume de reator, portanto, as bactérias, para sobreviver, passam a utilizar de forma mais intensa nos seus processos metabólicos a própria matéria orgânica biodegradável componente de suas células.

O principal objetivo do tratamento do lodo de esgoto é gerar um produto mais estável e com menor volume para facilitar seu manuseio e, conseqüentemente, reduzir os custos nos processos subseqüentes (PEDROZA et al., 2010). Nesse sentido, Cassini et al. (2003) salientam que se tem investido em técnicas de minimização de lodos em sistemas

de tratamento e geralmente esse processamento é realizado por meio das seguintes etapas:

- a) adensamento:** remoção de umidade, seguida pela consequente redução de volume;
- b) estabilização:** remoção da matéria orgânica (redução de sólidos voláteis);
- c) condicionamento:** preparo para a desidratação, especialmente mecânica;
- d) desidratação:** remoção de umidade (redução de volume);
- e) higienização:** remoção de organismos patogênicos;
- f) disposição final:** destinação final dos subprodutos.

2.6 ATERROS SANITÁRIOS – DESTINAÇÃO DO LODO

No Brasil, a disposição final do lodo geralmente é o aterro sanitário. Além do alto custo, que pode chegar a 50% do custo operacional de uma ETE, a disposição de um resíduo com elevada carga orgânica no aterro, agrava ainda mais o problema com o manejo dos resíduos urbanos (DUFROYER et al., 2013). No estado de São Paulo, cerca de 70% da produção de lodo de esgoto das estações de tratamento é encaminhada para aterros sanitários (MACHADO, 2001).

De acordo com levantamentos da Abrelpe (2007), apenas 39% dos municípios brasileiros dão destino e tratamento adequado aos resíduos sólidos urbanos coletados, o que significa que mais da metade dos municípios utiliza-se de formas sanitariamente inadequadas para disposição de resíduos, tais como: aterros controlados e lixões.

Neste panorama, a alternativa de codisposição de lodo séptico em aterros sanitários, por exemplo, fica limitada a um universo aproximado de 2 mil municípios, uma vez que os aterros controlados e vazadouros a céu aberto são inadequados para tal fim. É válido ressaltar que, deste total, deverão ser observadas ainda as características de porte do aterro, bem como as características de balanço hídrico, manejo dos líquidos percolados e condições operacionais da frente de trabalho (LUPATINI et al., 2009).

Segundo a Agência Europeia do Ambiente (AEA, 1997) a seleção para um método adequado de disposição do lodo seco deve ser baseada nos seguintes critérios:

- Ambiental: Qualidade do esgoto e características da quantidade, adequação do tratamento, infraestrutura para o acondicionamento do lodo e transporte;

- Econômico: Custo capital, custo de operação anual, renda da exploração do valor comercial do produto final através do reuso;
- Técnico: Avaliação da flexibilidade, simplicidade e rentabilidade de cada alternativa;
- Social: Informar ao público e partes interessadas nas alternativas propostas, apresentando as medidas tomadas e os direitos e obrigações das partes interessadas para gerar uma aceitação social.

2.7 WETLANDS CONSTRUÍDOS

Os sistemas de Wetlands Construídos são capazes de promover a depuração de águas residuárias através de uma combinação de processos físicos, químicos e biológicos, que incluem sedimentação, precipitação, adsorção às partículas do material filtrante, assimilação pelos tecidos das plantas e transformações microbiológicas (VYMAZAL, 2008).

O grande diferencial desses sistemas de tratamento controlados é a aplicação de plantas macrófitas, que naturalmente promovem o processo de estabilização do lodo através da incorporação do fósforo e nitrogênio. A maior parte dos estudos na literatura, onde sistemas com e sem plantas foram comparados, mostraram que sistemas com plantas têm performances melhores em todos os parâmetros e indicadores testados (STEFANAKIS et al., 2014). Segundo Salati (2009), a utilização desta planta nesses sistemas é devida a sua capacidade de resistir a águas altamente poluídas com grandes variações de nutrientes, pH, substâncias tóxicas, metais pesados e variações de temperatura.

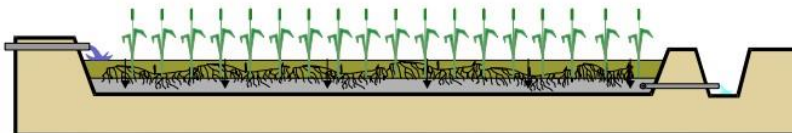
Esses sistemas são concebidos e construídos para utilizar os processos naturais, que envolvem a vegetação, material filtrante e microorganismos, para auxiliar no tratamento de águas residuárias. Podem ser classificados em dois grupos, superficial e subsuperficial, sendo este último subdividido em função do fluxo hidráulico como horizontal e vertical (VYMAZAL, 2008).

As definições apresentadas a seguir para os dois tipos de WC do grupo de fluxo subsuperficial foram dadas por Hoffmann (2001):

a) Wetlands Construídos de fluxo vertical (WCFV): são mais adequados para locais onde há restrição de espaço para sua aplicação. Visto que esse tipo de sistema apresenta maior eficiência de tratamento e necessita de menos área. Nos WCFV as águas residuárias são bombeadas de forma intermitente na

superfície e então, ocorre a drenagem vertical através das camadas filtrantes em direção ao sistema de drenagem no fundo do leito. A representação desse tipo de Wetlands está apresentada na Figura 2.

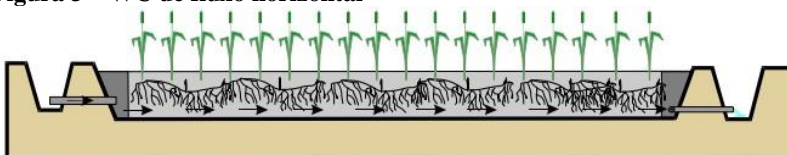
Figura 2 – WC de fluxo vertical



Fonte: SALATI, 2009.

b) Wetlands Construídos de fluxo horizontal (WCFH): os primeiros projetos de Wetlands Construídos de fluxo subsuperficial foram os de leito de fluxo horizontal e são ainda os tipos mais usuais. Esses sistemas são uma opção interessante especialmente em locais sem o fornecimento de energia e baixo gradiente hidráulico, visto que os de fluxo vertical precisam de bombeamento. Nos WCFH as águas residuárias fluem através dos poros médios abaixo da superfície do leito num caminho para atingir a zona de saída, como se pode observar na Figura 3.

Figura 3 – WC de fluxo horizontal



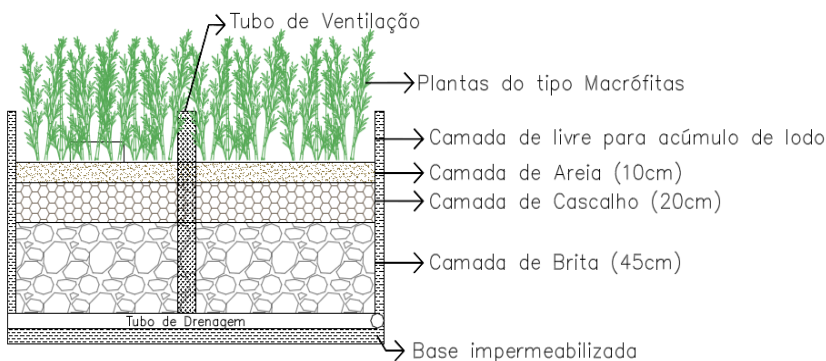
Fonte: SALATI, 2009.

Os sistemas híbridos, também conhecidos como combinados, consistem na associação em série dos filtros plantados de fluxos verticais e fluxos horizontais. Nestes sistemas, as vantagens e desvantagens dos WCFV e WCFH podem ser combinadas de maneira a complementar cada um deles individualmente. É possível produzir um efluente com baixa concentração de DBO_5 o qual é completamente nitrificado e parcialmente desnitrificado (SEZERINO, 2006).

2.8 WETLANDS CONSTRUÍDOS PARA TRATAMENTO DE LODO (WCL)

Os WCL consistem em tanques rasos com um meio filtrante (pedras, brita e areia ou outro meio granular), com macrófitas emergentes plantadas em sua superfície, seguindo layout apresentado na Figura 4. Nesses sistemas, o lodo é bombeado e espalhado na superfície do Wetlands, onde a maior parte do seu conteúdo de água é perdida por evapotranspiração das plantas e pela drenagem através das camadas de filtro de cascalho, deixando um lodo residual concentrado na superfície (UGGETTI et al., 2011).

Figura 4 – Esquema do layout de WCL



Fonte: A autora.

O termo bioossólido é uma forma de ressaltar os aspectos benéficos do lodo, valorizando a utilização produtiva, em comparação com a mera disposição final improdutivo, por meio de aterros, disposição superficial no solo ou incineração (ANDREOLI; VON SPERLING, 2001). Em outras palavras, Stefanakis et al. (2014) explicam que se passa a usar o tempo “Bioossólido” a medida que o material é tratado, usando um dos métodos de desaguamento, com o objetivo de melhorar suas características para uso benéfico e é deixado no sistema de tratamento de esgoto para ser destinado para uma das várias opções de exploração adicional, como usar de fertilizante, adubo de solo, etc. (STEFANAKIS et al., 2014).

Uma pesquisa realizada na Tailândia elaborada por Koottatep et al. (2005) apresentaram resultados muito positivos no uso dos Wetlands Construídos para tratamento de lodo proveniente de Tanque Séptico. O estudo foi conduzido na Estação de Pesquisa Ambiental da AIT (Instituto Asiático de Tecnologia) usando três WCL em escala piloto. Como resultado de dois anos de pesquisa encontraram-se eficiências de remoção elevadas para os parâmetros de NTK, Nitrogênio Amoniacal, Sólidos Totais e DQO, sendo em uma faixa de 79-89%, 60-81%, 76-82% e 96%, respectivamente.

Um aspecto importante para o funcionamento desses sistemas é a definição do tempo de vida operacional dos WCL, o qual dura normalmente 30 anos e é dividido entre duas ou três fases operacionais de 8-12 anos (STEFANAKIS et al., 2014). A primeira etapa da fase operacional é chamada de comissionamento, a mesma ocorre após o tanque ser construído e que as raízes são plantadas. Então, iniciam-se leves carregamentos para permitir o crescimento das plantas e um melhor ajuste no ambiente do leito. O período de comissionamento pode durar mais de dois anos, depois disso, o período principal de carregamento é iniciado. No final de cada etapa operacional, o lodo residual acumulado é removido e o WCL é esvaziado. Quando os WCL estão propriamente projetados, a porcentagem de Sólidos Totais após 8-12 anos de operação pode ultrapassar de 40% (dependendo do clima e da Taxa de Aplicação do Lodo), enquanto a mineralização do esgoto é também alcançada, mais de 25% do material orgânico é normalmente removido.

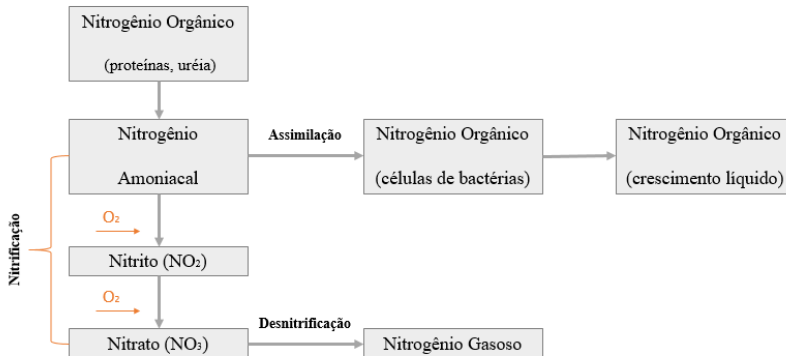
2.9 REMOÇÃO DE NITROGÊNIO E FÓSFORO

Jordão e Pessoa (2005) apresentam uma análise sobre a estabilização do esgoto que engloba ambos parâmetros de nutrientes analisados neste projeto. As definições trazidas neste item a respeito de nitrogênio e fósforo são baseadas nesta bibliografia.

O Nitrogênio está presente no esgoto sob a forma de nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato ou gás nitrogênio e sua presença se faz necessária para promover os processos biológicos de estabilização do biossólido. Porém, se não houver controle da sua concentração durante o tratamento de esgoto, gera eutrofização, intoxicação aos peixes e continuará exigindo demanda de oxigênio do corpo receptor. A nitrificação é a conversão da amônia a nitrito, e em seguida para nitrato, a transformação completa que ocorre está ilustrada na Figura 5. Os grupos de microorganismos nitrificantes que realizam o

processo de transformação com presença do oxigênio dissolvido são as *nitrossomas* e *nitrobactérias*.

Figura 5 – Transformação do Nitrogênio em processo biológico



Fonte: Adaptado de JORDÃO e PESSOA, 2005.

Em conjunto com o nitrogênio, o Fósforo assume um papel importante nos processos biológicos aeróbios no tratamento de esgotos e está presente no mesmo sob a forma de ortofosfato (fósforo inorgânico), polifosfato e fósforo orgânico. Assim como o nitrogênio, a presença do fósforo em grande concentração no lançamento do efluente nos corpos receptores gera eutrofização e por isso, as exigências legais em vários estados costumam fixar um limite de 1,0mgP/L nos padrões de emissão. No Quadro 2 podem ser verificados os mecanismos de remoção desses e demais poluentes através do tratamento pelo sistema de WCL.

Quadro 2 – Mecanismos de Remoção de poluentes em um sistema de WCL.

Constituintes das Águas Residuárias	Mecanismos de Remoção
Sólidos Totais	<ul style="list-style-type: none"> - Sedimentação/Filtração - Decomposição - Precipitação e co-precipitação - Oxidação pelos microrganismos - Assimilação pelas plantas

Constituintes das Águas Residuárias	Mecanismos de Remoção
DBO e DQO	<ul style="list-style-type: none"> - Degradação microbiana (aeróbia e anaeróbia) - Sedimentação (acumulação de matéria orgânica na superfície do sedimento) - Filtração
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> - Reações de adsorção aos sítios das plantas e microbiota - Precipitação com Al, Fe, Ca e argilo minerais do solo - Formação de complexos com a matéria orgânica - Assimilação pelas plantas aquáticas e microbiota
Nitrogênio	<ul style="list-style-type: none"> - Amonificação seguida pela Nitrificação e Desnitrificação - Assimilação pelas plantas aquáticas - Volatilização da amônia
Metais	<ul style="list-style-type: none"> - Sedimentação/Filtração - Reações de adsorção - Precipitação com material orgânico e acúmulo no sedimento - Precipitação na forma de hidróxidos e sulfetos - Assimilação pelas plantas aquáticas - Transformações microbianas (oxidação)
Patógenos	<ul style="list-style-type: none"> - Sedimentação/Filtração - Radiação Ultravioleta - Oxidação - Adsorção a matéria orgânica - Predação e ataque por vírus - Morte natural - Exposição a biocidas excretados por macrófitas

Fonte: Adaptado de CUNHA, 2006.

2.10 LEGISLAÇÃO VIGENTE

Com o intuito de verificar se as variáveis analisadas no lodo de superfície e no líquido percolado podem ser aplicados na agricultura como adubo e água de irrigação, respectivamente, é necessário comparar os resultados obtidos com as exigências apresentadas na Instrução Normativa nº 25 de 2009 do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento e na Resolução CONAMA nº 375/2006.

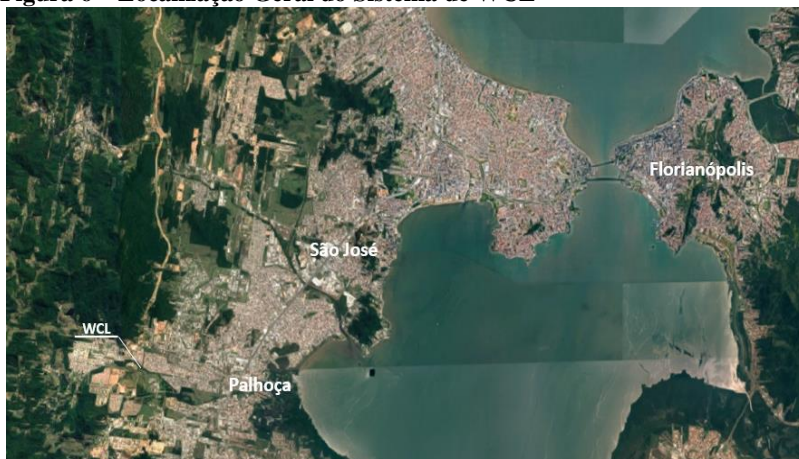
Nessas normas constam orientações para gestão, tratamento e características do lodo de esgoto e seus derivados para obterem potencial de uso agrícola. Os documentos têm enfoque nos limites de substâncias orgânicas tóxicas presentes no lodo, porém, também apresentam orientações para testes de fertilidade do solo, que envolvem a quantidade de Nitrogênio Amoniacal e Fósforo Ortofosfato, variáveis essas analisadas no trabalho. Além dessas orientações, ainda constam regras para verificação de pH, Sólidos Voláteis e Sólidos Totais.

3 METODOLOGIA

3.1 LOCAL DO ESTUDO

O sistema em operação de Wetlands Construídos para Tratamento de Lodo apresentado neste trabalho está localizado no município de Palhoça (Figura 6), o qual faz parte da região metropolitana de Florianópolis, no litoral do Estado de Santa Catarina. Segundo o 8º Distrito de Meteorologia (1984), o clima típico da região é mesotérmico úmido, com temperatura anual média de 20,3°C. A umidade relativa do ar média é de 82% e tem chuvas bem distribuídas durante todo ano, com precipitação média anual em torno de 1500mm.

Figura 6 – Localização Geral do Sistema de WCL



Fonte: *Google Maps* (2003).

O estudo foi realizado no período de agosto de 2016 a maio de 2017 e além dos parâmetros operacionais, baseou-se nas análises de parâmetros físico-químicos do lodo de alimentação do sistema, do lodo de superfície e do líquido percolado proveniente do tratamento.

3.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

O Sistema de Wetlands Construído para tratamento de Lodo (WCL) pertencente à Municipalidade de Palhoça foi implantado e é operado pela empresa Rotária do Brasil Ltda. O sistema é composto por

quatro unidades de fluxo vertical com macrófitas do tipo *Cyperus papyrus*, de 400m² cada. Anexo ao sistema encontra-se a Estação de Tratamento de Esgoto com o sistema de Reator em Batelada Sequencial – RBS, o qual atende o Loteamento Madri, que totaliza aproximadamente a contribuição de 8 mil pessoas. Na Figura 7 pode ser observada a localização dos Sistemas de WCL e ETE.

Figura 7 – Localização do WCL e ETE anexa ao Sistema



Fonte: Google Maps (2003).

O sistema é composto por quatro WCL, porém apenas dois estão em funcionamento atualmente. Um dos sistemas em repouso teve sua operação durante dez anos consecutivos e há um ano encontra-se parado, no período de desaguamento – esse denominado de WCL paralisado 1 (WCL P1). No período de alimentação do mesmo, recebeu lodo de esgoto proveniente de caminhões limpa-fossa que esvaziam tanques sépticos e caixas de gordura. Além dessa fonte, ainda recebeu esgoto aeróbio do sistema de RBS, totalizando assim, uma carga de aproximadamente 80 m³ de lodo por semana ou 38.400 m³ de lodo lançados na superfície do Wetlands, o que resultou em uma camada de lodo acumulado de 1,30m.

Durante a operação do WCL P1, o mesmo recebia carga de lodo durante 5 dias consecutivos e ficava em repouso durante 2 dias. A partir dos valores de volume de lodo aplicado, concentração de Sólidos Totais e área de aplicação, estima-se que era operado com uma carga de lodo igual a 960 kgST/m².ano, taxa de aplicação essa considerada alta de acordo com as literaturas relacionadas à pesquisa, que apresentam taxas entre 10 – 250 kgST/m².ano (STEFANAKIS et al., 2014).

No momento de paralisação da Unidade WCL P1, mais duas Unidades iniciaram o funcionamento. Atualmente, a Unidade 1 e a Unidade 2 (WCL1 e WCL2) recebem o lodo proveniente do RBS e o lodo de tanques sépticos e caixas de gordura, sendo que o último tipo de lodo citado é transportado por caminhões limpa-fossa. A quarta Unidade WCL encontra-se paralisada (WCL P2) e com cobertura vegetal completa em sua superfície. Visto que o tempo de desenvolvimento desta pesquisa foi limitado, escolheram-se os WCL1 e WCL2 para serem o foco da análise dos parâmetros operacionais e físico-químicos. Pode-se observar na Figura 8 os 4 WCL existentes no local do estudo.

Figura 8 – Registro do Sistema com cada WCL indicado



Fonte: A autora.

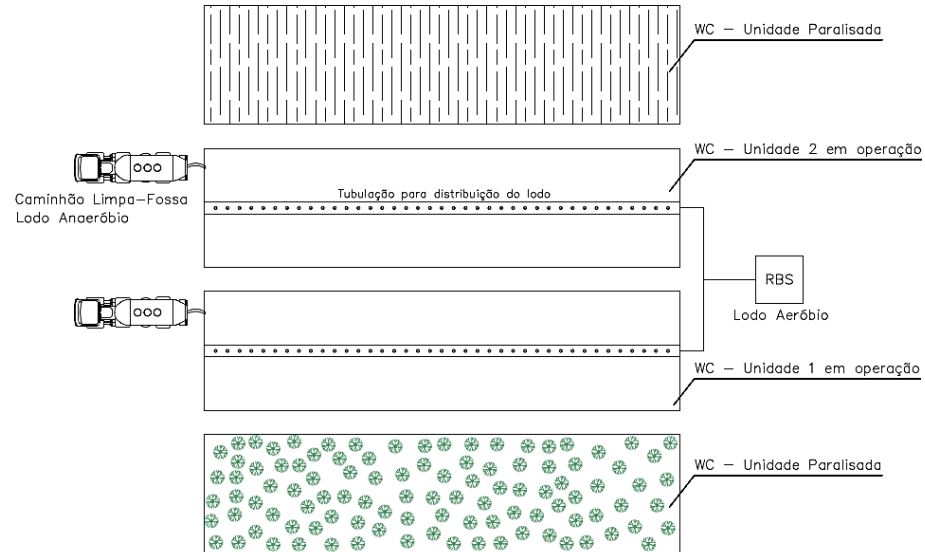
As Unidades em questão possuem 10 metros de largura por 40 metros de comprimento e são alimentadas diariamente pelos dois tipos de lodos citados. O lodo de alimentação dos WCL proveniente do Reator RBS é normalmente realizado através das tubulações de distribuição, as quais ficam acomodadas ao longo de toda a superfície do tanque. Porém, no período de coleta de dados para o presente estudo, o lodo aeróbio foi descarregado na superfície dos WCL por mangueiras de forma pontual, visto que a tubulação de distribuição se encontrava obstruída.

A alimentação dos Wetlands proveniente dos caminhões limpa-fossa sempre é feita de forma pontual, à medida que os veículos estacionam em um local perto dos sistemas, uma mangueira é alocada em um ponto dos WCL e se despeja o conteúdo. O controle do número de caminhões e da geração de volume total mensal é realizado pelo operador dos WCL, dados esses que serão apresentados posteriormente neste trabalho.

3.3 PROCEDIMENTOS DE CAMPO E AMOSTRAGEM

Com a finalidade de analisar se o sistema consegue estabilizar o volume de lodo diário que recebe, coletas do lodo de alimentação, do lodo de superfície e do líquido percolado foram realizadas mensalmente e foram submetidas a análises físico-químicas. De modo a caracterizar o sistema de forma mais completa, cada unidade foi dividida em 4 quadrantes, assim como mostrado na Figura 9, e em cada coleta, os locais amostrados eram escolhidos de forma aleatória para as mesmas serem realizadas.

Figura 9 – Representação das Unidades de WCL



Fonte: A autora (2017).

Até o final do estudo, foram realizadas 6 visitas em campo. Em cada uma delas eram realizados aproximadamente 11 pontos amostrais: 4 da Unidade WCL 1, 4 da Unidade WCL 2, 1 do lodo dos caminhões limpa-fossa, 1 do lodo do reator RBS e 1 do líquido percolado. O número de coletas variava de acordo com a situação em que o sistema se encontrava na data da visita, caso nos dias anteriores à mesma tivesse ocorrido períodos intensos de chuva, o processo da coleta era dificultado e um menor número de amostras era coletado. Assim como, se no dia da coleta não houvesse o descarregamento por caminhões limpa-fossa, inviabilizava-se as análises da amostra em questão.

3.4 LOCAL DAS ANÁLISES LABORATORIAIS

As análises dos parâmetros físico-químicos foram realizadas nos laboratórios de manipulação do Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado (GESAD) pertencente ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Além desses, contou-se também com a infraestrutura do Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA) pertencente ao mesmo Departamento.

3.5 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Através das análises foram avaliadas as variações dos seguintes parâmetros: Potencial Hidrogeniônico (pH), Fósforo Ortofosfato ($P-PO_4^{3-}$), Nitrogênio Amoniacal ($N-NH_4^+$), Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos Totais (SF) e Sólidos Voláteis Totais (SV).

3.5.1 pH

A verificação do pH nas amostras foi realizada através do equipamento Medidor de pH portátil Alphakit AT-150. Alocou-se o eletrodo em cada embalagem que continha as amostras sólidas (neste caso diluída em 1:10) e nos recipientes que continham as amostras líquidas, aguardou-se a estabilização do valor e foi registrado o resultado.

3.5.2 Fósforo Ortofosfato ($P-PO_4^{-3}$)

Tanto para a análise de Fósforo Ortofosfato quanto para a de Nitrogênio Amoniacal, o procedimento inicial para a amostra sólida (Lodo de Superfície) foi o mesmo: Adicionou-se 5g de amostra em tubo cônico tipo Falcon e se completou com 45 ml de água para que houvesse a diluição inicial de 10 vezes. Em seguida, os tubos eram alocados em uma centrífuga de bancada (5 minutos a 4500 rpm) para que os sólidos ficassem acumulados na parte inferior dos tubos. Após retirar os tubos da centrífuga, filtrava-se a parte líquida superficial da amostra com filtro de fibra de vidro.

Já para as amostras líquidas, o procedimento inicial era realizado de forma distinta. A amostra era coletada diretamente do recipiente, sem ser necessária a etapa de centrifugação e filtração. Até essa parte, todas as etapas se repetiam para realizar as análises de Fósforo Ortofosfato e Nitrogênio Amoniacal.

Para se obter o resultado de Fósforo Ortofosfato, utilizou-se o Método Colorimétrico do Ácido Vanadomolibdofosfórico (APHA, 2005), então adicionava-se 4 ml de cada amostra e 1 ml de Vanadato em um tubo de vidro com tampa rosqueável. Em seguida, aguardava-se cerca de 10 minutos e se realizava a leitura no equipamento Espectrofotômetro com a calibração relativa ao parâmetro.

3.5.3 Nitrogênio Amoniacal ($N-NH_4^+$)

O procedimento inicial ocorria da mesma forma que foi descrito em Fósforo Ortofosfato. A diferença entre as análises dos parâmetros é a parte final, após a filtração das amostras sólidas. No caso da análise de Nitrogênio Amoniacal, na etapa subsequente, todas as amostras ainda eram diluídas 50 vezes antes de os reagentes serem aplicados. Em seguida, era realizada a análise através do Método Colorimétrico de Nessler (VOGEL, 1981), adicionando 5ml da amostra diluída e soluções reagentes. Por fim, esperava-se cerca de 10 minutos para se realizar a leitura no Espectrofotômetro com a faixa de leitura da calibração da Nitrogênio Amoniacal.

Figura 10 – Tubos para leitura dos parâmetros (10/03/17)

Fonte: A autora (2017).

3.5.4 Série de Sólidos

A obtenção dos Sólidos foi realizada através do Método Gravimétrico, o qual ocorreu da seguinte forma: pesava-se uma amostra inicial entre 18g e 30g e se alocava as amostras na estufa por 24 horas à temperatura de 105°C. Em seguida, a massa residual era pesada, resultado esse correspondente ao peso de Sólidos Totais. Por fim, as amostras eram colocadas na mufla durante 1 hora à 550°C. O peso final indicava o valor de Sólidos Fixos e a diferença entre o peso de Sólidos Totais e Sólidos Totais Fixos, resultava no valor de Sólidos Totais Voláteis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS

A descarga do lodo na superfície dos WCL ocorre em bateladas, à medida que o lodo excedente no Reator necessita ser retirado e que os caminhões de limpa-fossa chegam à Estação. Portanto, trata-se de um sistema sem controle rígido quanto à taxa de aplicação de lodo, podendo acontecer várias vezes durante o dia. Durante o estudo foi observada que em média, chegaram 3 caminhões limpa-fossa de 8.500 litros por dia, para descarregarem todo o seu conteúdo entre os dois WCL em funcionamento. Além disso, o reator RBS descarrega cerca de 50.000 litros por semana. Mesmo que a descarga dos dois tipos de lodo não obedeça a uma regra de aplicação entre os tanques, o lodo de superfície representa uma mistura entre eles e após um período, apresenta características similares em ambos WCL.

A partir da estabilização que ocorreu nos WCL e da precipitação no local, gerou-se um volume de líquido percolado diário que drena pelo fundo dos tanques para um reservatório que fica anexo ao Sistema. A fim de garantir uma análise mais direta do volume e das características do líquido percolado específico de cada WCL, seria necessário que o sistema funcionasse com um tempo de paralisação maior entre as descargas e que cada Wetlands possuísse sua tubulação de drenagem individual. Dessa forma, o volume drenado poderia trazer características específicas sobre o lodo de superfície de cada WCL, considerando também a contribuição da chuva e o seu potencial de drenagem. Porém, como no sistema real analisado não é isso que ocorre, amostras do líquido percolado foram coletadas do poço do percolado, mostrando assim, características sobre a mistura do líquido proveniente dos dois sistemas de WCL em funcionamento, e eventualmente, da água de chuva que atingia e era drenada nos quatro WCL.

4.1.1 Volume de Lodo de Alimentação aplicado no Sistema

Lodo dos Caminhões Limpa-Fossa

Um dos pontos importantes para a análise da eficiência e das condições operacionais do sistema de WCL é a análise do volume de lodo de alimentação no sistema proveniente dos caminhões limpa-fossa e do reator RBS. A Tabela 1 apresenta dados reais do volume descartado pelos caminhões limpa-fossa. Posteriormente, esses dados serão relacionados com os resultados obtidos em laboratório para que, dessa forma, seja possível analisar a carga dos parâmetros de entrada e saída no Sistema.

Tabela 1 – Registro de caminhões limpa-fossa que chegaram ao sistema de WCL entre abril de 2016 e maio de 2017.

Meses	Quantidade Total de Caminhões	Quantidade de Dias Registrados	Quantidade Média Diária de Caminhões	Volume Mensal (m ³)	Volume Médio Diário (m ³)
Abril	36	12	3,0	306,00	21,86
Maio	73	24	3,0	620,50	20,02
Junho	98	26	3,8	833,00	27,77
Julho	68	23	3,0	578,00	18,65
Agosto	55	22	2,5	467,50	15,08
Setembro	63	25	2,5	535,50	17,85
Outubro	64	25	2,6	544,00	17,55
Novembro	73	25	2,9	620,50	20,68
Dezembro	93	25	3,7	790,50	25,50
Janeiro	48	17	2,8	408,00	24,00
Fevereiro	84	20	4,2	714,00	35,70
Março	72	24	3,0	612,00	19,74
Abril	37	18	2,1	314,50	10,48
Maio	53	25	2,1	450,50	14,53

Fonte:

A autora.

De acordo com a Tabela 1, diariamente no Sistema chegam em média 3 caminhões limpa-fossa que descarregam um volume médio total de 12m³ em cada WCL em funcionamento, sendo assim, para as

posteriores análises de eficiência, considerou-se que a mesma taxa de aplicação de lodo ocorre em ambos WCL.

Lodo do Reator RBS

A Estação de Tratamento de Esgoto anexa ao sistema de WCL é formada por dois reatores em Batelada Sequencial (RBS) e um tanque de contato final, sendo que os reatores foram dimensionados para tratar no máximo 500 m³ em cada ciclo (THANS, 2003). A ETE recebe efluente proveniente dos tanques sépticos das residências do Loteamento Madri transportados através de uma rede coletora interna do Condomínio.

Parte do volume do lodo sedimentado nos reatores RBS é descartado nos tanques de Wetlands em funcionamento. O descarte do lodo excedente de cada reator para os WCL1 e WCL2 ocorre com uma periodicidade de 2 (duas) vezes semanais. Em cada descarte, o volume médio de lodo retirado de cada reator é de 12,5m³, o que totaliza um volume de lodo proveniente do Reator RBS de 50m³ por semana ou 10m³ por dia.

4.1.2 Taxa de Aplicação Superficial de Lodo

Um dos principais parâmetros necessários para considerar no dimensionamento de um WCL é a Taxa de Aplicação Superficial do Lodo (UGGETTI *et al.*, 2010). Esse parâmetro é importante para determinação dos parâmetros operacionais do sistema, como o tempo de repouso do leito e o número de aplicações por ano, as quais influenciam no potencial de desaguamento dos WCL e conseqüentemente, na eficiência do tratamento. Através dos dados obtidos em campo a respeito do gerenciamento e volume de lodo aplicado diariamente nos WCL, calculou-se a Taxa de Aplicação Superficial através da seguinte equação:

Equação 1: Taxa de Aplicação Superficial Anual (kgST/m².ano)

$$TA = \left(\frac{C_{ST} \times V_{ano}}{At} \right)$$

Nesta equação, a variável C_{ST} corresponde à Concentração de Sólidos Totais no Lodo de Alimentação (kg/m³), a V_{ano} ao Volume

médio total por ano de Lodo de Alimentação (m^3) e a A_t à Área total dos dois WCL em funcionamento (m^2). Na Tabela 2 observam-se os valores respectivos de cada variável e o resultado da Taxa de Aplicação.

Tabela 2 – Resultado para o Cálculo da Taxa de Aplicação Anual de Lodo de Alimentação.

Amostras	ST (kg/m^3)	Volume de Lodo Aplicado por dia (m^3)	Área Total (m^2)	Taxa de Aplicação Superficial Anual* ($kgST/m^2.ano$)
L1 - Lodo Reator RBS	0,81	10	800	38,4
L2 - Lodo Caminhões Limpa-Fossa	2,46	24		

*Considerando a quantidade média de 23 dias por mês com registro de caminhões.

Fonte: A autora.

Segundo as pesquisas apresentadas por Stefanakis *et al.* (2014), os diferentes sistemas de WCL apresentam taxas entre 10 – 250 $kgST/m^2.ano$. A partir dessa faixa de aplicação, o Sistema de WCL tratado neste trabalho que apresentou o resultado de 38,40 $kgST/m^2.ano$ pode ser caracterizado como de baixa Taxa de Aplicação Superficial.

4.2 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO

4.2.1 Caracterização físico-química do Lodo de Alimentação

A seguir, apresentam-se na Tabela 3 os resultados obtidos para as análises dos parâmetros físico-químicos realizadas para ambas amostras do Lodo de Alimentação. A partir da Tabela, é possível comparar as características entre o lodo anaeróbio proveniente principalmente de Tanques Sépticos e o lodo aeróbio residual proveniente dos RBS.

Tabela 3 – Comparação dos parâmetros dos lodos de alimentação do sistema

Amostra (n=3)	Dados	Parâmetros				
		pH	ST	SV	P-PO ₄ ⁻³ (mg/L)	N-NH ₄ ⁺ (mg/L)
L1 - Lodo Reator RBS	Média	7,11	810 mg/L	510 mg/L	175,75 mg/L	695,00 mg/L
	Desvio Padrão (DP)	0,36	330 mg/L	320 mg/L	129,30 mg/L	389,18 mg/L
	Carga (gST/m².semana)		50,62	-	10,98	43,44
L2 - Lodo Caminhões Limpa-Fossa	Média	6,47	2460 mg/L	980 mg/L	104,10 mg/L	1055,00 mg/L
	DP	0,38	-	-	-	-
	Carga (gST/m².semana)		369,00	-	15,62	158,25

Fonte: A autora.

Ao realizar a comparação entre os parâmetros dos lodos de alimentação, observa-se que o proveniente do caminhão limpa-fossa (L2) é levemente mais ácido que o do reator (L1). Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que atividades acidogênicas ocorrem nos tanques sépticos e também no compartimento fechado dos caminhões, fator que acelera a degradação anaeróbia incompleta da matéria orgânica.

Além desse fator, as concentrações de Sólidos Totais e Nitrogênio Amoniacal em L2 resultaram em valores mais elevados que L1. Na maioria das bibliografias pesquisadas, a Nitrogênio Amoniacal apresenta-se com concentrações bem inferiores ao resultado. Porém, nas pesquisas descritas por Kengne (2008) algumas amostras obtiveram resultados até superiores para o lodo de caminhão limpa-fossa (Tabela 4).

Tabela 4 – Resultados de pesquisas para lodo de caminhões limpa-fossa

Parâmetros	Faixa de Resultados
pH	6,55-9,34
ST (%)	0,3-12,7
SV (%)	31-90,7
NH ₄ ⁺ (mg/L)	80-3300

Fonte: Adaptado de KENGNE (2008).

Ao analisar a Tabela 4, os resultados para os correspondentes parâmetros do lodo de alimentação (L1 e L2) estão contidos na Faixa de Resultados, visto que a mesma é composta por valores com grande variação. Outros resultados de ST com valores mais elevados do que os usuais são citados por Jordão e Pessoa (2005). A Tabela 5 mostra a caracterização do tipo de lodo em relação à concentração de Sólidos, listando limites máximos desse parâmetro que podem ser encontrados em cada tipo de Esgoto Bruto.

Tabela 5 – Características Típicas de Sólidos no Esgoto Bruto

Matéria Sólida	Esgoto Forte (mg/L)	Esgoto Médio (mg/L)	Esgoto Fraco (mg/L)
ST	1160	730	370
SV	580	375	195
SF	580	355	175

Fonte: Adaptado de JORDÃO e PESSOA, 2005.

A partir da Tabela 5, o L1 pode ser caracterizado como Esgoto Forte e o L2 estaria acima dessa caracterização, o que é típico em se tratando de lodo de esgoto.

4.2.2 Caracterização do Líquido Percolado

O volume de percolado gerado diariamente é um indicador do potencial de drenagem do sistema em operação. É mostrado que os WCL podem alcançar resultados de desaguamento semelhantes com processos mecânicos de desaguamento, como centrífugas, filtros prensas, filtros de vácuo, etc. De fato, em muitos casos, os WCL apresentaram eficiências mais altas comparadas com esses métodos (STEFANAKIS et al., 2014).

Devido a isso, realizou-se a análise do volume médio de percolado gerado por dia no Sistema. Após a drenagem natural do líquido através das camadas dos tanques, o mesmo flui para um reservatório por meio de tubulações assentadas na base dos Wetlands. O líquido percolado permanece armazenado no poço até alcançar o nível de acionamento da bomba de recirculação, a qual faz com que o conteúdo do poço seja levado à parte inicial do sistema de RBS para ser

reintegrado à ETE. Na Tabela 6 são apresentados os detalhes do poço do Líquido Percolado, bem como o volume médio do Líquido que é recirculado diariamente no Sistema.

Tabela 6 – Média diária do volume de percolado gerado

Diâmetro do Poço	1,00 m
Altura do Poço	2,00 m
Volume de Recalque	1,57 m ³
Tempo de Funcionamento da Bomba	45 min
Nº de acionamentos por dia	10 vezes
Vazão da Bomba	2 m ³ /h
Volume médio recirculado por dia	15,70 m ³

Fonte: A autora.

Ao realizar a comparação entre o volume de lodo da entrada (lodo de alimentação) e o volume de saída (líquido percolado), é possível concluir o volume médio perdido por evapotranspiração, e retido no leito. Considerando que o volume médio diário de lodo aplicado é cerca de 35m³ e o volume médio diário de líquido percolado gerado é 15m³, observa-se uma perda de água aproximadamente de 60%.

A partir da análise do volume médio diário gerado do Líquido Percolado no Sistema, caracteriza-se os parâmetros físico-químicos na Tabela 7 em termos de carga, bem como de concentração. Calculou-se a Carga dos Parâmetros através da multiplicação da concentração dos parâmetros obtida no laboratório com o volume de 15,70m³ apresentado na Tabela 6 e se considerou a área de 800m², resultante de ambos os Wetlands em operação.

Tabela 7 – Apresentação dos resultados para as análises de LP

Amostra (n=6)	Dados	Parâmetros				
		pH	ST	SV	P-PO ₄ ⁻³	N-NH ₄ ⁺
LP - Líquido Percolado	Média	7,18	830 mg/L	450 mg/L	27,36 mg/L	216,92 mg/L
	DP	0,06	250 mg/L	120 mg/L	12,07 mg/L	61,68 mg/L

	Carga (gST/m².semana)	81,44	-	2,68	21,28
--	---	-------	---	------	-------

Fonte: A autora.

4.2.3 Caracterização do lodo acumulado nos WCL

Nesta seção serão apresentadas as análises da Série de Sólidos, Fósforo Ortofosfato e Nitrogênio Amoniacal para o lodo acumulado na superfície do WCL1 e WCL2, apenas o pH será analisado em um item posterior, específico para esse parâmetro. De acordo com os resultados expostos na Tabela 8, com n=5 amostras, percebe-se uma alta concentração de Sólidos, Fósforo Ortofosfato e Nitrogênio Amoniacal no lodo acumulado.

Tabela 8 – Apresentação dos resultados para as análises dos WCL

Parâmetros	Dados	WCL1	WCL2
pH	Média	7,24	7,01
	DP	0,38	0,43
ST (%)	Média	21,0%	27,7%
	DP	4,9%	2,5%
SV (%)	Média	44,6%	51,8%
	DP	3,5%	14,9%
P-PO₄⁻³ (mg/kg)	Média	114,29	115,90
	DP	57,73	40,50
N-NH₄⁺ (mg/kg)	Média	1032,83	717,08
	DP	309,87	377,56

Fonte: A autora.

Sólidos

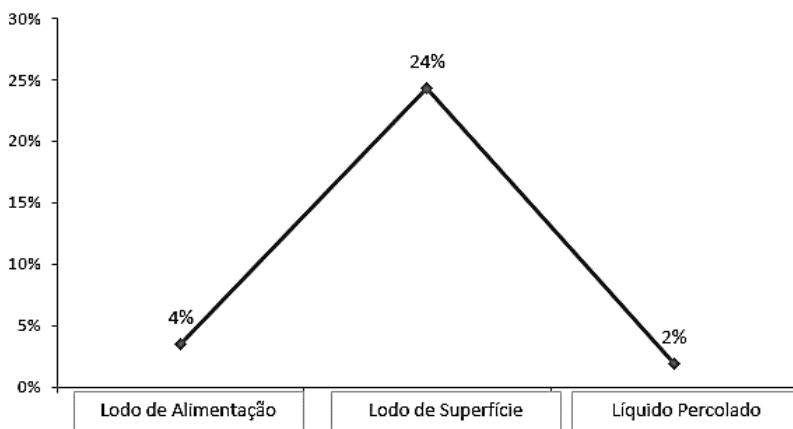
A série de sólidos analisada nesta pesquisa divide os Sólidos Totais entre Sólidos Voláteis Totais e Sólidos Fixos Totais. Sólidos Totais Voláteis representam a porção de Sólidos Totais que tem origem e composição orgânica. Nesse contexto, é comprovado que os WCL são capazes de diminuir a carga de SV e assim, diminuir a porção orgânica de sólidos acumulados. A grande maioria dos sólidos adicionados ao sistema é retida nos leitos através de processos físicos, como a filtração

entre as camadas porosas, fazendo com que a água drenada fique praticamente livre de sólidos (STEFANAKIS et al., 2014).

Na Tabela 8 observa-se que a porcentagem de Sólidos Totais é alta ao realizar a comparação com a concentração deste parâmetro no Lodo de Alimentação, com uma concentração de aproximadamente 6 vezes maior. Isso se deve ao fato da grande descarga diária nos leitos, onde a parte líquida drena e a parte sólida permanece na sua superfície. Segundo Stefanakis (2014), quanto mais alto o conteúdo de Sólidos Totais na torta de lodo, mais eficiente é considerado o tratamento no WCL.

Segundo Vincent *et al.* (2011), os dois tipos de lodos de alimentação do Sistema tratado neste trabalho, aeróbio - proveniente do RBS e anaeróbio – proveniente dos Tanques Sépticos, são caracterizados pelo alto teor de matéria orgânica e pelo baixo teor de sólidos totais fixos (VINCENT et al., 2011). A Figura 11 mostra a variação de ST entre os três tipos de amostra (Lodo de Alimentação, Lodo de Superfície e Líquido Percolado). Para o cálculo da porcentagem média, considerou-se os valores de ST obtidos em todas as coletas.

Figura 11 – Variação da porcentagem média de ST para cada tipo de amostra

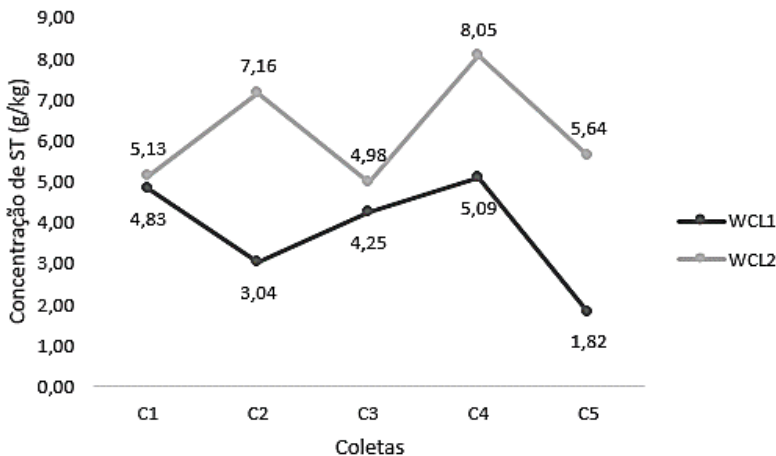


Fonte: A autora.

A média de concentração de ST (%) nos Lodos de Alimentação é praticamente 80% menor do que a do Lodo de Superfície. Esse aumento na segunda amostra corresponde ao acúmulo de material na superfície do leito e ao desaguamento que ocorre através das camadas. Já o valor bem inferior, comparado ao Lodo de Superfície, apresentado na amostra do Líquido Percolado demonstra que a maior parte da matéria sólida permanece nos WCL.

Visto que não se registra a aplicação do Lodo de Alimentação para cada WCL em funcionamento, acredita-se que a mesma seja realizada de forma equivalente entre eles. Observa-se na Figura 12 que a concentração de ST nos tanques obedece basicamente à mesma regra de variação. Apenas na Coleta 2 (C2) houve uma diferença de comportamento entre os tanques, o que pode ser explicado por um maior descarregamento de lodo no WCL 1, o qual não conseguiu obter um desaguamento superior e a concentração de ST diminuiu.

Figura 12 – Comparação entre as concentrações de ST (g/kg) entre os WCL1 e WCL2 durante as coletas



Fonte: A autora.

Também se pode concluir que a concentração de ST no WCL2 é, em geral, superior à concentração encontrada em WCL1. Visto que os dois tanques estão localizados no mesmo local e recebem o mesmo volume de chuva, essa diferença não se relaciona com fatores externos que influenciam diretamente o Sistema. A maior concentração de ST

em WCL2 provavelmente está relacionada com a maior quantidade de plantas ativas que continuam realizando o tratamento em WCL2 e dessa forma, possibilita-se a retenção de maior concentração de matéria sólida. Além disso, essa alteração pode ser explicada pela diferença entre os descarregamentos que eventualmente pode acontecer entre os tanques.

Segundo a Resolução CONAMA n° 375/2006: “Para fins de utilização agrícola, o lodo de esgoto ou produto derivado será considerado estável se a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais for inferior a 0,70”. Na Tabela 9 pode-se observar a relação citada para as diferentes amostras:

Tabela 9 – Relação entre Sólidos Voláteis e Sólidos Totais para as amostras de Lodo de Superfície e Líquido Percolado

Série de Sólidos	WCL1	WCL2	LP
SV	1,80 g/kg	3,04 g/kg	0,45 g/L
ST	3,81 g/kg	6,19 g/kg	0,83 g/L
SV/ST	0,47	0,49	0,54

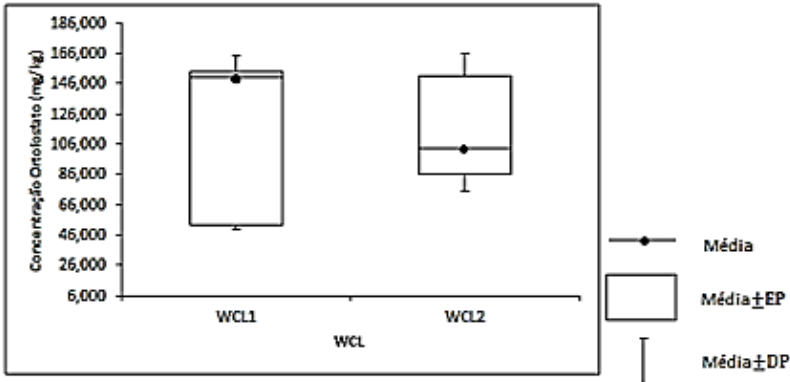
Fonte: A autora.

A relação dos valores médios de Sólidos Totais Voláteis e Sólidos Totais obtidos a partir da análise de todas as coletas realizadas ficou inferior a 0,7, o que os torna aptos ao reuso agrícola na análise deste critério.

Fósforo Ortofosfato

O fósforo passa por digestão ácida para se tornar ortofosfato, o qual é a principal forma de P (Fósforo) assimilada pelos vegetais e dentre os elementos desse grupo, as formas predominantes são: H_2PO_4^- e HPO_4 . Neste trabalho analisou-se a variação do ortofosfato dissolvido nas amostras, o qual representa a forma inorgânica do fósforo advindo da composição biológica (GUIDOLINI et al., 2010). A Figura 13 apresenta a variação dos resultados obtidos para o Fósforo Ortofosfato nas amostras dos Lodos de Superfície.

Figura 13 – Gráfico *Box plot* com médias, erro padrão (EP), desvio padrão (DP) das concentrações de $P-PO_4^{3-}$



Fonte: A autora.

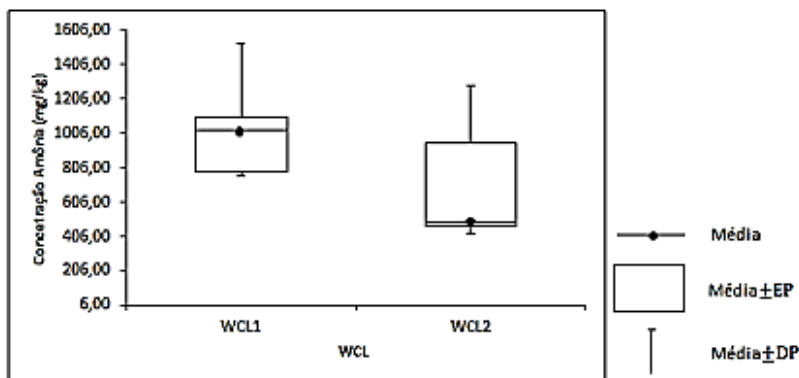
Para o crescimento das plantas, é primordial a etapa de Fixação e os elementos que proporcionam essa etapa são o P (fósforo) e N (nitrogênio). Porém, as plantas conseguem absorver apenas de 15% a 25% do fósforo total (MACHADO, 2001) e por isso, normalmente é utilizado um adubo catalisador para ter maior eficiência de absorção. A fonte principal de adubo fosfatado é a rocha fosfatada, que é uma fonte não renovável, por isso, é importante a existência de alternativas para geração do composto.

A partir dos resultados obtidos para o Lodo de Superfície, é possível concluir que o lodo de superfície em ambos WCL apresenta praticamente o mesmo resultado para a concentração de Fósforo Ortofosfato. Fator que pode indicar que em ambos tanques existe o acúmulo de lodo rico em fósforo, o que é um fator positivo para o reuso agrícola do mesmo.

Nitrogênio Amoniacal

A Figura 14 apresenta a variação dos resultados obtidos para o parâmetro de nitrogênio amoniacal nas amostras da superfície dos Wetlands em funcionamento.

Figura 14 – Gráfico *Box plot* com médias, erro padrão (EP), desvio padrão (DP) das concentrações de $N-NH_4^+$



Fonte: A autora.

Os biossólidos apresentam em sua constituição quantidades significativas de nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas, sendo o nitrogênio e o fósforo os que normalmente se apresentam em maior quantidade (MACHADO, 2001). Considerando que o nitrogênio mineral presente no solo é logo absorvido ou perdido para a atmosfera, a matéria orgânica representa uma fonte contínua de nitrogênio, capaz de atender as demandas nutricionais das plantas e alcançar a máxima produção das culturas.

A partir dos resultados para Nitrogênio Amoniacal, observa-se que ocorre fato semelhante ao Fósforo Ortofosfato e se pode dizer que a concentração de Nitrogênio Amoniacal é alta no Lodo de Superfície devido à recente deposição de lodo de alimentação que fica acumulado na superfície dos tanques.

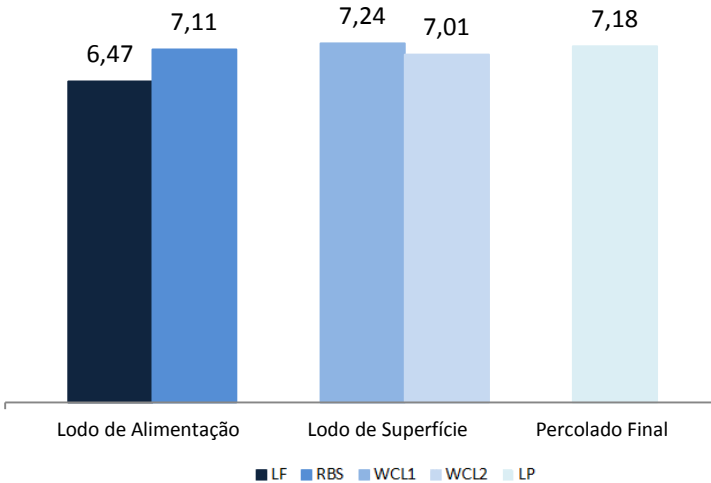
4.2.4 Análise da acidez do Sistema

De acordo com Stefanakis et al. (2014), geralmente, o valor do pH tende a estar ligeiramente na zona ácida entre 6,5-7,0 no lodo de superfície. Em outras palavras, é esperado que o valor de pH esteja ligeiramente ácido quando existir uma contínua decomposição da matéria orgânica e ocorra a liberação de sais pelas plantas. Então, no momento que o WCL está paralisado, sem descarga de lodo, o valor de

pH normalmente fica entre 6,0-6,5. Já nos momentos de alimentação do sistema e finalização da etapa de descanso, o pH volta a ter valores mais alcalinos.

Ao analisar as referências bibliográficas com os resultados obtidos para pH (Figura 15), pode-se dizer que o lodo proveniente do reator RBS e caminhões limpa-fossa e o líquido percolado obedeceram ao esperado, ou seja, o resultado médio das coletas obteve pH entre 6,5 – 7,0.

Figura 15 – Comparação do parâmetro pH nas diferentes amostras



Fonte: A autora.

Por outro lado, no momento da mistura dos lodos de alimentação, quando o WCL1 e WCL2 encontravam-se no período de descanso, o pH não obteve valores mais ácidos como era descrito e sim, manteve-se neutro. Esse fator pode ser explicado pelo fato de que no sistema real não era reservado períodos adequados para descanso dos tanques para permitir a atividade natural de decomposição. Em outras palavras, pode-se dizer que a descarga de lodo em WCL1 e WCL2 acontecia de forma mais recorrente do que seria o ideal para que a estabilização do lodo pudesse ocorrer e consequentemente, o pH apresentar valores mais ácidos no Lodo de Superfície.

4.2.5 Remoção da Carga de Poluentes

Com o intuito de analisar a eficiência do Tratamento, realizou-se a análise da variação da Carga de Sólidos Totais ($\text{gST}/\text{m}^2\cdot\text{semana}$), da Carga de Fósforo Ortofosfato ($\text{gP-PO}_4^{-3}/\text{m}^2\cdot\text{semana}$) e da Carga de Nitrogênio Amoniacal ($\text{gN-NH}_4^+/\text{m}^2\cdot\text{semana}$) para a entrada e saída do Sistema, resultados os quais se encontram na Tabela 10. Para a Carga de Entrada foi considerado o volume do Lodo de Alimentação e para a Carga de Saída, considerou-se o volume do Líquido Percolado.

Tabela 10 – Apresentação da eficiência de redução da Carga dos parâmetros

Amostras	Vol. Médio Diário (m^3)	Concentração (g/m^3)			Carga de Poluentes ($\text{gST}/\text{m}^2\cdot\text{semana}$)		
		ST	P- PO_4^{-3}	N- NH_4^+	ST	P- PO_4^{-3}	N- NH_4^+
LF e RBS	34,0	3270,0	279,8	1750,0	419,6	26,6	201,7
LP	15,7	830,0	27,4	216,9	81,4	2,7	21,28
Remoção					81%	90%	89%

*Considerou-se a área total de 800m^2 para o cálculo das Cargas de Poluentes.

Fonte:

A autora.

O volume e a concentração totais do Lodo de Alimentação foram obtidos através da soma das mesmas variáveis no Lodo do RBS e no Lodo dos Caminhões. No caso do cálculo da Carga total de cada parâmetro, também foram somadas as Cargas correspondentes em ambos Lodos citados.

A remoção da Carga de Sólidos Totais nas amostras de lodo é importante para observar o potencial de desaguamento do material e em consequência, obter o quanto o mesmo pode reduzir seu volume, o que é o primeiro e principal objetivo para essa tecnologia de tratamento (STEFANAKIS et al., 2014). A porcentagem de remoção das Cargas comprova que o tratamento ocorre com alta eficiência para os

parâmetros observados, apesar do Sistema de WCL estar em funcionamento sem controle rígido da aplicação de lodo nos tanques.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Este estudo teve como proposta analisar os parâmetros operacionais e de eficiência de um Sistema de WCL em operação, por meio da observação do volume aplicado de lodo de alimentação, do volume gerado de líquido percolado e dos parâmetros físico-químicos das amostras de cada etapa do processo de tratamento. Uma vez que os sistemas escolhidos para análise neste trabalho são Wetlands em funcionamento, os quais recebem grande volume de lodo diariamente (cerca de 24m³), os resultados mostraram como ocorre o processo inicial de tratamento de lodo em WCL.

Baseado nesses dados, calculou-se a Taxa de Aplicação Superficial (TAS) de lodo e a eficiência de remoção das cargas de poluentes. A partir do resultado obtido para a TAS de 38,4 kgST/m².ano, caracterizou-se o Sistema como de baixa TAS, apesar do grande volume de aplicação. Ao se analisar a remoção da carga dos poluentes entre o lodo de alimentação e o líquido percolado, obtiveram-se eficiências de 81% na remoção de ST, 90% na de Fósforo Ortofosfato e 89% na de Nitrogênio Amoniacal. Resultados esses que comprovam que os nutrientes e os sólidos ficam retidos no lodo do leito, o que promove o tratamento do lodo.

Nesta pesquisa pode-se comprovar, a partir dos parâmetros analisados, que os Sistemas de WCL são robustos, portanto, são capazes de desaguar e tratar grandes volumes de lodo, no lugar dos usuais sistemas. Por isso, um ponto importante a se analisar são os benefícios de realizar a disposição do lodo em WCL ao invés de serem destinados à aterros sanitários. A diminuição da disposição nesses locais e a possibilidade de utilizar o lodo e o líquido percolado para irrigação são vantagens importantes. Os WCL também surgem como uma alternativa para disposição do lodo excedente gerado em decantadores e reatores de ETE's, no lugar da usual disposição em leitos de secagem, onde seria apenas uma etapa temporária para posteriormente dispor o material em aterro sanitário.

Diante do progressivo aumento populacional, os problemas ambientais resultantes da geração de resíduos da atividade humana exigem ações que viabilizem o equilíbrio entre consumo e reuso. No caso do lodo de esgoto não é diferente, pois além da grande geração de

volume que exigirá cada vez áreas maiores para sua disposição final, existe ainda o risco de gerar problemas ambientais, causado pela ausência de tratamento adequado do biossólido. A grande vantagem do uso de Wetlands Construídos para Tratamento de Lodo é a mudança de visão sobre o lodo excedente dos processos de tratamento de esgoto. Em outras palavras, é deixar de enxergar o lodo excedente como um passivo ambiental e sim, passar a vê-lo como uma fonte de nutrientes que proporciona redução no uso de recursos naturais em processos produtivos, ao beneficiar solos degradados, e dessa forma, agrega valor a algo que até então só gerava custos para seu gerenciamento.

5.2 SUGESTÕES PARA A OPERAÇÃO E MONITORAMENTO DE WCL

Após toda a análise realizada no presente trabalho, é possível traçar algumas recomendações para a operação e o monitoramento de sistemas de Wetlands Construídos para tratamento de lodo. Um desses pontos seria desde sua concepção inicial ser planejado um sistema individual de drenagem do líquido percolado para cada tanque, pois dessa forma será possível controlar a quantidade gerada em cada etapa de tratamento dos WCL. Existem diferenças de geração e qualidade do líquido entre os momentos de alimentação do sistema, período de descanso e reativação, por isso, seria interessante observar todos os parâmetros operacionais em cada um desses casos para poder realizar a sua caracterização e análise de forma mais próxima à realidade.

Outra recomendação para o dimensionamento desses sistemas seria destinar um período para manutenção dos tanques e áreas ao redor do mesmo, pois dessa forma certifica-se que o funcionamento continue com mesma qualidade e eficiência. Ademais, seria aconselhável que o operador do sistema recebesse treinamentos periódicos sobre a forma correta de distribuição do lodo, taxa de aplicação do mesmo e a importância da sua manutenção periódica. Ademais, é importante que o controle de caminhões limpa-fossa que chegam ao Sistema diariamente sejam registrados ao longo de todo tempo de vida útil do WCL, assim como, realize-se o registro diário do descarregamento de lodo das demais fontes.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1993). **Projeto, construção e operação de unidades de tratamento complementares e disposição final dos efluentes de tanques sépticos: procedimentos**. NBR7229. Rio de Janeiro: ABNT. 15p.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2007.

ANDRADE NETO, C. O. **Sistemas para tratamento de esgotos sanitários: experiência brasileira**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997. 301p.

ANDREOLI, C. V.; POMPEO, R. P. Introdução. In: Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p.21.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgoto: Tratamento e disposição final**. Rio de Janeiro: Editora ABES, 2001.

APHA - American Public Health Association. **Standard methods for examination of water and wastewater**. 21. ed. Washington, 2005. 1195 p

BARROS, R.T.V. et al. Saneamento. **Manual de saneamento e proteção ambiental para os municípios**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1995. 221p.

BELLI FILHO, P. et al. **Lodos de Tanques Sépticos**-caracterização e tratamento anaeróbio em um digestor piloto. In: XXIX Congresso Interamericano de Ingeniería Y Ambiental: Forjando el Ambiente Que Compartimos, 2004, San Ruan -Puerto Rico, 2004. v. 1.

BONNET, B. R. P; LARA, A. I.; DOMASZAK, S. C. **Indicadores biológicos de qualidade sanitária do lodo de esgoto**. In: Manual de métodos para análises microbiológicas e parasitológicas em reciclagem agrícola de lodo de esgoto. SAPENAR/PROSAB. 1998, p.11-26.

CAMPOS, J. R. et al. **Tratamento Combinado de Tanque Séptico e de Fossas com Esgoto Sanitário**. In: Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p.237.

CASSINI, S. T.; et al. **Hidrólise e Atividade Anaeróbia em Lodos**. In: Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento de Biogás. Rio de Janeiro: ABES, 2003. p.12.

CUNHA, C. A. G. **Análise da eficiência de um sistema combinado de alagados construídos** na melhoria da qualidade das águas. 2006. 174 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

DODANE, P. H. et al. **Capital and Operating Costs of Full-Scale Faecal Sludge Management** and Wastewater Treatment Systems in Dakar, Senegal. *Environmental Science & Technology*, v. 46, p. 3705-3711, 2012.

DUFROYER, C. R.; SOUZA, P. C.; RESENDE, F. B. DE; JÚNIOR, M. G. S.; Impacto da Codisposição de Lodo Séptico nas Trincheiras de um Aterro Sanitário. **Revista Eletrônica de Educação da Faculdade Araguaia**, 4, p282-286. 2013.

EEA – European Environment Agency. **Sludge Treatment and Disposal**, Management Approaches and Experiences. 1997. Environmental Issues Series, no. 7.

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde. **Manual de saneamento**. 3ª ed. revisada. Brasília: FUNASA, 2006. 408p.

FURTADO, D. F. C. **Caracterização de lodo de tanque séptico e tratamento em filtros plantados com macrófitas**. Dissertação (Mestrado). 2012. 101 p. Curso de Engenharia Ambiental, Departamento do Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

GONÇALVES, F. B. **Disposição oceânica de esgotos sanitários.** ABES. Rio de Janeiro, 1997.

GUIDOLINI, J. F. **Ortofosfato como parâmetro indicador de qualidade da água em diferentes pontos da bacia do Rio Uberaba.** Artigo Científico. III Seminário de Iniciação Científica e Inovação Tecnológica. Uberaba – MG. Publicado em 14/10/2010.

HARTMANN, C. M. et al. **Definições, histórico e estimativas de geração de lodo séptico no Brasil.** In: Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p.25-37.

HOFFMANN, H. et al. **Technology Review of Constructed Wetlands.** 2011. Published by: Deutsche Gesellschaft fur, Germany.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – PNAD**, Rio de Janeiro, v. 32, p. 1-134, 2012.

IMHOFF; K.; IMHOFF, K. R. **Manual de tratamento de águas residuárias.** São Paulo, 1986. 301 p.

IWAKI, G. **Destinação Final de Lodos de ETAs e ETEs.** Publicado em 19/01/2017.

JORDÃO, E. P.; ALÉM SOBRINHO, P. **Lodo de fossas sépticas: uma análise crítica.** In: Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p.375-383.

JORDÃO, E. J.; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos.** 6ª edição. 989 p.

KENGNE, I. M. et al. **Effects of faecal sludge application** on growth characteristics and chemical composition of *Echinochloa pyramidalis* (Lam.) Hitchc and Chase and *Cyperus papyrus* L. *Ecological Engineering*, 34. 2008.

KOOTTATEP, T. et al. (2005) “Treatment of septage in constructed wetlands in tropical climate: lessons learnt from seven years of operation.” **Water, Science and Technology**, vol 51, no 9.

LIBRALATO, L., GHIRARDINI, A.V., AVEZZU, F. To centralize or to decentralize: An overview of the most recent trends in wastewater treatment management. **Journal of Environmental Management**. 94, 2012. p61-68.

LUPATINI, G. et al. **Tratamento de Lodo de fossa/tanque séptico**. In: Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p.80-140.

MACHADO, M. F. S. **A situação brasileira dos biossólidos**. 828 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Unicamp, Campinas, São Paulo, 2001.

MACHADO, L. O., Apostila: **Adubação Fosfatada**. 6 p. 2001. – Disponível em <<http://www.dpv24.iciag.ufu.br>>.

MAGRI, M. E. et al. **Desempenho de diferentes espécies de macrófitas no desaguamento de lodo anaeróbio em filtros plantados de fluxo vertical**. 26º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre/RS. 9 p., 2011.

MAZIVIERO, G.T. **Avaliação do potencial citotóxico, genotóxico e mutagênico de lodo de esgoto por meio dos sistemas – teste allium cepa e tradescantia pallida**. 2011. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas). UNESP/Rio Claro/SP/2011.

METCALF; EDDY, INC. **Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse**. New York: Ed. McGraw-Hill, 2002. 1334 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, **Plano de Saneamento Básico**, Lei nº 11.445/07.

MOORE, J. G. Jr. **Sludge: what can be done with it?** In: BORCHARDT, J. A. et al (org.). Sludge and its ultimate disposal. Michigan: Ann Arbor Science Publishers, 1981.p xi-xvii.

OITAVO DISTRITO DE METEOROLOGIA, **Aspectos do Clima de Florianópolis**. Instituto Nacional de Meteorologia, 1984, Porto Alegre.

OLIVEIRA FILHO, A. “Após nove anos da implantação da Política Nacional de Saneamento Básico – O que mudou?” – Disponível em: <<http://www.sambiental.com.br/>>, Publicado em 20/01/2016.

PEDROZA, M. M. et al. Produção e Tratamento de Lodo de Esgoto – Uma Revisão. **Revista Liberato**, v. 11, n. 16, Novo Hamburgo. 2010.

PHILIPPI, L. S. **Funcionamento de fossas sépticas em condições reais: volume e acumulação de lodo**. In: Congresso Brasileiro De Engenharia Sanitária e Ambiental, 17, 1993, Natal: ABES, 1993. Vol. 2, tomo I, p.633-642.

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – Disponível em: <<http://www.pnud.org.br/ODM7.aspx>>.

PROSAB – **Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo**. Edital 1. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 464p.

PROSAB – **Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final**. Edital 1. Rio de Janeiro: ABES, 2009. 388p.

SALATI, E. **Controle de Qualidade de Água através de Sistemas de Wetlands Construídos**, FBDS – Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2009.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado da Saúde. Diretoria de Vigilância Epidemiológica. **Destino de esgoto por municípios e regionais de saúde**, segundo SIAB – Sistema de Informação da

Atenção Básica e CASAN – Companhia Catarinense de Águas e Saneamento. Relatório, 2005. 16p.

SEZERINO, P. H. **Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas** (Constructed Wetlands) no pós- tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical. Tese de Doutorado em Engenharia Ambiental. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 171p. 2006.

SILVA, S. M. C. P. et al. **Principais contaminantes do lodo**. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. p.69-121

SILVA JUNIOR, É. D. et al. Balanço de sólidos e nutrientes em sistema de alagado construído para tratamento de resíduos de fossa e tanque séptico. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 9, n. 17, 2013.

SMIT, R. J.; KANG, J. **Impact of septic tank sludge on municipal wastewater**. In: Sludge and its ultimate disposal. Michigan: Ann Arbor Science Publishers, 1981. p 63-82.

STEFANAKIS, A.; AKRATOS, C.; TSIHRINTZIS, V. **Vertical Flow Constructed Wetlands, Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment**. 1ª edição. 2014. 291p. Elsevier Science.

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

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F.L. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse**. 1995. Tata McGraw-Hill Publishing Co. Ltd, New Delhi.

THANS, F. C. **Controle Operacional de Reator em Bateladas Sequenciais (RBS):** Ajustes na Concentração de Oxigênio Dissolvido visando a Remoção de Nutrientes. 2008. Dissertação de Mestrado. UFSC.

TREIN, C. M. et al. Tratamento descentralizado de esgotos de empreendimentos comercial e residencial empregando a ecotecnologia dos Wetlands construídos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 4, p.351-367. 2015.

UGGETTI, E. et al. Sludge treatment wetlands: A review on the state of the art. **Bioresourcse Techonology**, Espanha, v. 101, p. 2905-2912, 2010.

UGGETTI, E. et al. **Sludge dewatering and mineralization in a sludge treatment wetlands pilot plant** with different design configurations. In preparation. In: Sewage sludge treatment in constructed wetlands: Technical, economic and environmental aspects applied to small communities of the Mediterranean Region. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental de la Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.

USEPA. **Constructed Treatment Wetlands**. EPA/843/F-03/013, U.S. Environmental Protection Agency: Office of Water. Washington, EUA, 2004.

VOGEL, A. I. **Análise Inorgânica Qualitativa:** Guanabara. 4. ed. Rio de Janeiro, RJ., 1981. 690 p.

VON SPERLING, M. **Lodos Ativados**. Vol. 4, 2ª edição ampliada, DESA, UFMG. 2002.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Vol. 1, 3ª. edição, DESA, UFMG. 2005.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. **Lodo de esgotos: características e produção**. In: Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG; Curitiba: SANEPAR. 2001. 484 p.

(Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 6). cap. 2, p. 17-67.

VINCENT, J. et al. Sludge drying reed beds for septage treatment: Towards design and operation recommendation. **Bioresource Technology**, França, v. 102, p. 8327-8330, 2011.

VYMAZAL, J.; KROPFLOVÁ, L. **Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub- surface flow**. Dordrecht: Springer, 2008.

WHITE, KEVIN D. **Integration of Decentralized Wastewater Management Concepts Into an Urban “Centralized” Infrastructure in Mobile, Alabama**. Final Report. 2005.

WHO – World Health Organization; UNICEF. **Progress on sanitation and drinking water – 2015 Update and MDG Assessment**. Switzerland, 80p. Disponível em: <<http://www.wssinfo.org/>>.