

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

JULIANA GUSTI LOZER

**DESAGUAMENTO E HIGIENIZAÇÃO DE LODO DE ESGOTO
UTILIZANDO ESTUFA AGRÍCOLA SOBRE LEITOS DE
SECAGEM**

**VITÓRIA
2012**

JULIANA GUAISTI LOZER

**DESAGUAMENTO E HIGIENIZAÇÃO DE LODO DE ESGOTO
UTILIZANDO ESTUFA AGRÍCOLA SOBRE LEITOS DE
SECAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental.
Orientador: Prof. Dr. Ricardo Franci

**VITÓRIA
2012**

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

L925d Lozer, Juliana Guasti, 1987-
Desaguamento e higienização de lodo de esgoto utilizando
estufa agrícola sobre leitos de secagem / Juliana Guasti Lozer. –
2012.
108 f. : il.

Orientador: Ricardo Franci.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Lodo residual. 2. Estufas para cultivo. 3. Secagem. 4.
Esgotos. I. Gonçalves, Ricardo Franci. II. Universidade Federal
do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 628



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**“Desaguamento e higienização de lodo de esgoto,
utilizando estufa agrícola sobre leitos de secagem”.**

JULIANA GUASTI LOZER

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ricardo Franci Gonçalves
Orientador – DEA/CT/UFES

Prof. Dr. Sérgio Túlio Alves Cassini
Examinador Interno – DEA/CT/UFES

Profa. Dra. Márcia Regina Pereira Lima
Examinadora Externa – IFES

Coordenadora do PPGA: Profa. Dra. Regina de Pinho Keller

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Vitória, ES, 31 de agosto de 2012.

À minha família, pelos valores ensinados.

Agradecimentos

A Deus pela vida e todas as bênçãos.

Aos meus pais Marlene (em memória) e José Ângelo, e ao meu irmão André pelo incentivo e apoio aos meus estudos.

Ao meu noivo Ricardo Ribeiro do Nascimento e a sua família por estarem sempre presentes.

À Universidade Federal do Espírito Santo e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental

Ao Prof. Dr. Florindo dos Santos Braga pela oportunidade de ingresso no curso.

Ao Prof. Dr. Ricardo Franci pela fundamental orientação para o término do curso.

Aos membros da banca examinadora: Prof. Dr. Ricardo Franci, Prof. Dr. Sérgio Túlio Alves Cassini e a Prof^a. Dr^a. Márcia Regina Pereira Lima, pela avaliação do trabalho.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo pelo aprendizado durante todas as disciplinas.

À Coordenação do Mestrado em Engenharia Ambiental.

Ao CNPq pela bolsa de Mestrado.

À Companhia Espírito Santense de Saneamento pelo auxílio imprescindível na realização deste trabalho, em especial à M-GGQ e M-GMA.

À equipe da M-DGP pela ajuda, amizade e profissionalismo.

A I-DSU, em especial Vinícius, por seu comprometimento com o projeto.

Ao Roque e Gildásio, queridos operadores da ETE Castelo, pelo interesse e confiança no projeto.

A Práxis estatística pela consultoria prestada na análise dos resultados.

RESUMO

O lodo de esgoto é o resíduo produzido em maior volume nas Estações de Tratamento de Esgoto e, após ser submetido a algum processo de higienização pode ser utilizado como bio-sólido na agricultura. Neste contexto, o presente trabalho apresenta como principal objetivo o estudo do desempenho de estufas agrícolas sobre leito de secagem no desaguamento e na higienização do lodo de descarte de uma estação de tratamento de esgoto operada por reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo associado a um biofiltro aerado submerso, fundamentado na exposição prolongada do lodo à radiação solar em leitos de secagem. A pesquisa foi realizada em escala real na Estação de Tratamento de Esgoto de Castelo, em três repetições consecutivas, com duração de 28 dias cada. Em cada repetição foram utilizados quatro leitos de secagem, destes, dois foram cobertos com módulos de estufa agrícola e os outros ficaram expostos às alterações climáticas. As cargas de sólidos totais aplicadas nos leitos de secagem variaram de 6,4 kgSST.m⁻² a 17,8 kgSST.m⁻² durante as três repetições do experimento, sendo objeto de comparação dos resultados. Em relação à remoção do teor de umidade da massa de lodo, o leito coberto 1, que apresentava menores taxas de sólidos totais aplicadas, foi o que obteve melhores resultados, alcançando teores de umidade de até 6,8%. Para os parâmetros microbiológicos, ao final dos 28 dias do experimento foi constatado que: apenas o leito coberto 2 na repetição 2 apresentou resultados de coliformes termotolerantes abaixo de 10³ NMP/gST. Apenas na repetição 3 obteve-se ausência de *Salmonella* em todos os quatro leitos de secagem e, por fim, as reduções nas concentrações de ovos viáveis de helmintos não foram suficientes para enquadrar o bio-sólido como Classe A conforme estabelecido pela Resolução n° 375/2006 do Conama.

Palavras chave: Lodo de esgoto, higienização, estufa agrícola, leitos de secagem.

ABSTRACT

The sewage sludge is the main waste, in volume, in Sewage Treatment Plants and, after undergoing hygienization processes, it can be used as biosolid in the agriculture. In this scenario, the objective of this research is to study greenhouses performance on dewatering and sanitation of discarded sludge, based on long exposition to sunlight on dewatering beds, in a Sewage Treatment Plant applying Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor associated with submerged aired biofilter. This research was carried on large scale at the Sewage Treatment Plant of Castelo using three consecutive repetitions lasting 28 days each. For all the runs it was used four dewatering beds, two covered by greenhouse modules and two exposed to weather conditions. The total solids rate applied on the dewatering beds ranged from 6,4 kgSST.m⁻² to 17,8 kgSST.m⁻², being used as comparing parameter for the outcomes. For the sludge water content removal, the covered bed 1, which had lesser total solid rates, showed the best results, reaching total solid rates of up to 6,4%. For microbiologic parameters, it was observed by the end of the 28 days: only the covered bed 2, during the second repetition, showed results of fecal coliform below 10³ NMP/gST; only for repetition 3 was not observed *Salmonella* in all four beds; and viable helminths eggs reduction was not enough for characterizing biosolid as Class A, according established by 375/2006 Resolution of Conama.

Key-words: Sewage sludge, hygienization, greenhouse, dewatering beds.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição dos sólidos do lodo segundo tamanho e fração orgânica	23
Figura 2 - Relação entre o volume de lodo e sua umidade ou fração de sólidos	24
Figura 3 - Alguns métodos de secagem e disposição final do lodo.....	34
Figura 4 - Seção de um leito de secagem de lodo	35
Figura 5 - Vista dos reatores UASB – ETE Castelo	52
Figura 6 - Vista parcial dos quatro leitos de secagem após divisão	54
Figura 7 - Ponto de distribuição no momento da medição de vazão.....	55
Figura 8 - Vista panorâmica dos quatro leitos de secagem e dos módulos de estufa instalados nos leitos das extremidades direita e esquerda	56
Figura 9 - Detalhes do módulo de estufa construído sobre os leitos de secagem	57
Figura 10 - a) Pluviômetro utilizado; b) Termo-higrômetro instalado na estufa	58
Figura 11 - Desenho esquemático dos quatro leitos de secagem e respectivos tratamentos utilizados	61
Figura 12 - a) Pá utilizada na coleta; b) Amostra composta	62
Figura 13 - a) coletor de amostra em estado líquido; b) momento da coleta	63
Figura 14 - Médias das temperaturas dos leitos cobertos (LC) e temperaturas dos leitos descobertos (LD) durante as Repetições 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	71
Figura 15 - Monitoramento da umidade do lodo nos leitos cobertos (LC1 e LC2) e nos leitos descobertos (LD1 e LD2) durante as Repetições 1 (a), 2 (b) e 3 (c).....	73
Figura 16 - Gráfico da produtividade dos leitos de secagem na Repetição 1	76
Figura 17 - Gráfico do teor de ST das amostras ao final dos 28 dias versus taxas de ST aplicadas nos leitos de secagem, para as três repetições do experimento.....	76
Figura 18 - Gráfico do modelo de regressão proposto	78
Figura 19 - Resultados das análises de coliformes termotolerantes do lodo nos leitos cobertos (LC1 e LC2) e nos leitos descobertos (LD1 e LD2) durante as Repetições 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	87
Figura 20 - Perfis da temperatura em leitos de secagem com renovação de ar limitada: (a) baixa taxa e alta umidade do lodo (18 kgSST.m^{-2} , 68%) e (b) baixa taxa e baixa umidade do lodo (18 kgSST.m^{-2} , 11%)	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção per capita de sólidos suspensos totais e teor de sólidos e água nos reatores tipo UASB	21
Tabela 2 - Composição química típica de lodos brutos e lodos digeridos	25
Tabela 3 - Alguns microorganismos do lodo	28
Tabela 4 - Tempo de sobrevivência de patógenos no solo e plantas.....	29
Tabela 5 - Temperatura e tempo de exposição requeridos para a destruição de alguns patógenos e parasitas comuns.....	30
Tabela 6 - Concentrações máximas permitidas de indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos para classes A e B de lodo de esgoto	44
Tabela 7 - Características operacionais dos reatores UASB e do Biofiltro da ETE Castelo	52
Tabela 8 - Quantidade de lodo enviado a aterro sanitário periodicamente e respectivos custos	53
Tabela 9 - Cálculo da taxa teórica de ST aplicada nos leitos de secagem	60
Tabela 10 - Cálculo da diferença entre as taxas real e teórica de sólidos totais aplicada nos leitos de secagem na Repetição 1.....	68
Tabela 11 - Cálculo da diferença entre as taxas real e teórica de sólidos totais aplicada nos leitos de secagem na Repetição 2.....	69
Tabela 12 - Cálculo da diferença entre as taxas real e teórica de sólidos totais aplicada nos leitos de secagem na Repetição 3.....	69
Tabela 13 - Médias das temperaturas médias diárias, das máximas e das mínimas nos leitos cobertos, descobertos e no ambiente durante as 3 repetições do experimento ...	70
Tabela 14 - Comparação múltipla de Fisher de média de ordens para umidade e temperatura do ar nos leitos estudados	72
Tabela 15 - Comparação da média das temperaturas médias diárias e da umidade média do ar nos leitos cobertos e descobertos durante as repetições 1, 2 e 3	74
Tabela 16 - Teste de Mann-Whitney	77
Tabela 17 - Tempo de exposição, Taxa ST aplicada e teor de umidade final de 50% ...	79

Tabela 18 - Relação entre sólidos voláteis (SV) e sólidos totais (ST) nas amostras de lodo analisadas	80
Tabela 19 - Resultados da contagem de ovos viáveis de helmintos nas amostras analisadas durante as Repetições 1, 2 e 3	81
Tabela 20 - Espécies de helmintos encontrados durante as Repetições 1, 2 e 3 do experimento.....	83
Tabela 21 - Resultados para os parâmetros <i>Salmonella</i> sp. e umidade da amostra durante as 3 repetições do experimento	84
Tabela 22 - Resultados da densidade de coliformes termotolerantes para as amostras de lodo dos leitos cobertos e descobertos durante as três repetições	86

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
APHA	American Public Health Association
BF	Biofitro
CESAN	Companhia Espírito Santense de Saneamento
CETAN	Centro Tecnológico de Análises
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CV	Coeficiente de Variação
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ES	Espírito Santo
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
máx	Máxima
mín	Mínima
NBR	Norma Brasileira
NMP	Número Mais Provável
pH	Potencial Hidrogeniônico
RJ	Rio de Janeiro
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SD	Sólidos Dissolvidos
SES	Sistema de Esgotamento Sanitário
SF	Sólidos Fixos
SS	Sólidos Suspensos
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
ST	Sólidos totais
SV	Sólidos Voláteis
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UFF	Unidade Formadora de Foco
UFP	Unidade Formadora de Placa
USEPA	United States Environmental Protection Agency
UVB	Ultravioleta B
WEF	Water Environment Federation

LISTA DE SÍMBOLOS

L	Litro
hab	Habitante
d	Dia
g	Gramma
LC1	Leito coberto 1
LC2	Leito coberto 2
LD1	Leito descoberto 1
LD2	Leito descoberto 2
kg	Quilograma
m ²	metro quadrado
cm ³	centímetro cúbico
°C	grau Celsius
T _{LC}	Temperatura dos leitons cobertos
T _{LD}	Temperatura dos leitons descobertos
T _A	Temperatura ambiente
mL	Mililitro
min	Minuto
mm	Milímetro
cm	Centímetro
°	Grau
'	Minuto
”	Segundo
s	Segundo
m ³	metro cúbico
h	Hora
m	Metro
θ _h	tempo de detenção hidráulica
C _v	Carga orgânica volumétrica
s ²	desvio padrão
CV	Coeficiente de Variação
t	Tonelada
gMS	grama de Matéria Seca
R\$	Reais
mg/l	miligrama por litro
kgSST.m ⁻²	quilograma de sólidos suspensos totais por metro quadrado
mg/kg	miligrama por quilo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 ESGOTO SANITÁRIO	18
3.2 PROCESSO DE TRATAMENTO ANAERÓBIO: REATORES UASB	19
3.3 SUBPRODUTOS SÓLIDOS DO TRATAMENTO DE ESGOTO	20
3.4 CARACTERÍSTICAS DOS LODOS DE ESGOTO	22
3.4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS	22
3.4.2 CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS	25
3.4.2.1 Principais grupos de microorganismos presentes no lodo	25
3.4.2.2 Sobrevivência dos microorganismos no ambiente	29
3.5 TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO	31
3.5.1 PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO DO LODO	31
3.5.2 REMOÇÃO DA UMIDADE DO LODO	33
3.5.2.1 Desaguamento do lodo em leitos de secagem	34
3.5.2.2 Monitoramento de variáveis meteorológicas	38
3.5.2.3 Cobertura de leitos de secagem	39
3.5.3 REMOÇÃO DE MICROORGANISMOS DO LODO – HIGIENIZAÇÃO	40
3.5.4 UTILIZAÇÃO DO BIODOSSÍLIDO NA AGRICULTURA	41
3.6 ASPECTOS LEGAIS	44
3.7 PROCESSOS DE HIGIENIZAÇÃO COM O USO DE ENERGIA SOLAR	45
4 MATERIAL E MÉTODOS	50
4.1 PLANO EXPERIMENTAL	50
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	50
4.3 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ESGOTO NA ETE CASTELO	51
4.4 ADAPTAÇÃO DA ETE CASTELO PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO	54
4.4.1 DIVISÃO DOS LEITOS DE SECAGEM	54
4.4.2 MEDIÇÃO DA VAZÃO DE DESCARGA DE LODO	55
4.4.3 INSTALAÇÃO DOS MÓDULOS DE ESTUFA AGRÍCOLA	56
4.5 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DO PERÍODO DO EXPERIMENTO	57

4.6 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DE HIGIENIZAÇÃO DO LODO	59
4.6.1 CÁLCULO DA TAXA TEÓRICA DE SÓLIDOS TOTAIS APLICADA	59
4.6.2 PLANO DE AMOSTRAGEM	62
4.6.3 FREQUÊNCIA, QUANTIDADE E TIPOS DE ANÁLISES	64
4.6.3.1 Análises microbiológicas	64
4.6.3.2 Características físicas e químicas	64
4.6.3.3 Metodologias analíticas utilizadas e laboratórios responsáveis	65
4.7 ANÁLISE DOS DADOS	65
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
5.1 TAXA REAL DE SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS APLICADA NOS LEITOS DE SECAGEM	67
5.2 MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DO AR	70
5.3 MONITORAMENTO DA UMIDADE DO LODO	73
5.4 INFLUÊNCIA DA TAXA DE ST NO DESAGUAMENTO DO LODO	75
5.5 RESULTADOS DA RELAÇÃO SV/ST	80
5.6 RESULTADOS DA CONTAGEM DE OVOS VIÁVEIS DE HELMINTOS	81
5.7 RESULTADOS PARA O PARÂMETRO <i>SALMONELLA SP.</i>	83
5.8 RESULTADOS PARA COLIFORMES TERMOTOLERANTES	85
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	88
REFERÊNCIAS	91
APÊNDICES	99

1 INTRODUÇÃO

Considerado um resíduo sólido, o lodo de estações de tratamento de esgoto possui em sua composição de 40 a 80% de matéria orgânica, além de grandes concentrações de microrganismos patogênicos que podem causar danos à saúde humana e animal (GONÇALVES, *et al.*, 2001).

A disposição final desse resíduo tem gerado grandes preocupações relacionadas à transmissão de doenças devido a presença de patógenos e, eventualmente, de metais pesados e poluentes orgânicos. Além disso, as despesas envolvidas na destinação final podem alcançar até 60% dos custos operacionais de uma estação de tratamento de esgoto (ANDREOLI; LARA; FERNANDES, 1999).

O processo de higienização visa eliminar ou reduzir o conteúdo de microrganismos patogênicos, auxiliando na segurança biológica do produto final para as diferentes aplicações desejadas. A estabilização alcalina prolongada é um processo recomendado para higienização do lodo de esgoto, porém, além de gerar despesas relativas à compra e transporte de cal virgem para as empresas de saneamento, esse processo aumenta o volume de resíduos a ser encaminhados para destinação final.

O lodo biológico gerado em estações de tratamento do tipo UASB pode ser encaminhado diretamente às unidades de secagem dado ao seu elevado grau de estabilização e conseqüente facilidade de desidratação, alcançando elevados teores de sólidos totais (baixa umidade) em poucos dias após o descarte (SOARES, 2001).

Uma alternativa ambientalmente viável para o problema da disposição final do lodo de esgoto é a utilização na agricultura, desde que não ofereça riscos à saúde e ao meio ambiente. Para a utilização agrícola do lodo de esgoto é necessário que seus parâmetros de qualidade atendam ao disposto na resolução nº 375 do Conama (BRASIL, 2006). Assim, o processo de higienização torna-se uma etapa fundamental para a reciclagem agrícola do lodo (ROCHA, 2009).

Segundo Comparini (2001), a pesquisa de processos de tratamento que utilizem as condições favoráveis existentes em diversas regiões do Brasil, como a elevada

insolação e temperatura média ambiente, merecem atenção antes que soluções consagradas, porém, com custos elevados tenham preferência.

O uso de estufa agrícola para higienização de lodo de esgoto já foi objeto de estudo de alguns autores, utilizando-se apenas do aproveitamento da radiação solar ou mesmo com a queima do biogás (ANDREOLI *et al.*, 2000; COMPARINI, 2001; LIMA, 2010; ARGEL, 2010; DIAS, 2012). A estrutura plástica transparente permite a passagem dos raios solares, maximizando a retenção de calor e impedindo a entrada de águas pluviais e, com isso, acelera o processo de secagem do lodo, reduzindo a umidade, a concentração de microorganismos patogênicos e o volume a ser disposto.

A realização dessa pesquisa encontra justificativa na simplicidade operacional do tratamento do lodo de esgoto em estufas agrícolas, na ausência de dados sobre essa prática de higienização, com lodo gerado em UASB, no estado Espírito Santo, no aproveitamento da estrutura do leito de secagem para a instalação das estufas agrícolas e, ainda, na contribuição para o recente estudo de mapeamento das áreas potenciais para aplicação de lodo de esgoto na agricultura no estado do Espírito Santo (LIMA *et al.*, 2011).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral estudar o desempenho de estufas agrícolas no desaguamento e na higienização do lodo de descarte de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do tipo UASB + BF.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1 Caracterizar o lodo tratado e não tratado quanto aos parâmetros físico-químicos e microbiológicos;
- 2 Comparar a capacidade de desague de lodo anaeróbio em leitos de secagem convencionais e em leitos de secagem com estufa;
- 3 Avaliar a capacidade de higienização do lodo em leitos de secagem convencionais e leitos de secagem com estufa;
- 4 Avaliar os impactos dos parâmetros microbiológicos do lodo tratado para utilização na agricultura.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ESGOTO SANITÁRIO

Os esgotos sanitários, também designados por diversos autores pelo termo “águas residuárias”, possuem características bem definidas, sendo constituídos basicamente de despejos domésticos e pequenas quantidades de águas pluviais, águas de infiltração, e, eventualmente, despejos industriais (JORDÃO; PESSÔA, 2005).

O esgoto sanitário possui composição aproximada de 99,9% de água, e 0,1% de sólidos, que são compostos por proteínas, carboidratos, óleos e graxas, importantes nutrientes como nitrogênio e fósforo, além de produtos químicos, defensivos agrícolas e alguns metais pesados (CAMPOS *et al.*, 1999). Cerca de 30% dos sólidos encontrados nos esgotos são inorgânicos, como metais, areia e sais e os 70% restantes são compostos orgânicos (MALTA, 2001).

As principais características do esgoto são aquelas que conferem à água residuária, um aspecto indesejável do ponto de vista físico, químico ou biológico (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994). As características do esgoto muitas vezes retratam a realidade da população local, com hábitos alimentares distintos, refletindo na quantidade e qualidade do lodo, especialmente na concentração de organismos patogênicos, que servem como indicadores das condições sociais e de saúde de determinada comunidade (MELO, 2006).

A geração de esgoto doméstico no Brasil é bastante variável, encontrando-se na faixa de 80 a 200L.hab⁻¹.d⁻¹ (TSUTIYA, 2002).

3.2 PROCESSO DE TRATAMENTO ANAERÓBIO: REATORES UASB

Segundo Jordão e Pessoa (2005), o processo anaeróbico para tratamento de esgotos domésticos tem se destacado, especialmente o que utiliza reatores de manta de lodo (reatores UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor).

Esse tipo de reator teve origem na Holanda nos anos 70 para o tratamento de esgotos industriais de forte concentração de matéria orgânica e, como uma opção de tratamento de esgotos domésticos nos países de clima tropical como o Brasil, Colômbia, Índia, México, com eficiências de remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) alcançando 45 a 80%, e de Demanda Química de Oxigênio (DQO) alcançando 40 a 70% (JORDÃO; PESSÔA, 2005). Os baixos custos de implantação e de operação são fatores favoráveis a este processo de tratamento, calculando-se já existir no ano de 1999 mais de 300 reatores anaeróbios tipo UASB em operação no Brasil, tratando esgoto doméstico (CAMPOS *et al.*, 1999). No Estado do Espírito Santo, a Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN) opera 68 estações de tratamento de esgoto, e dessas, 17 estações possuem reatores do tipo UASB.

Esse processo de tratamento muitas vezes possui limitação na remoção de DBO em função das exigências legais impostas à qualidade do efluente tratado, com isso, têm surgido opções de pós-tratamento que tornam os reatores UASB competitivos com os processos aeróbios de grau secundário (JORDÃO; PESSÔA, 2005). Como opção de pós-tratamento pode-se citar a associação em série de biofiltros aerados submersos (BF) ao reator UASB, que segundo Gonçalves *et al.* (1993) mostrou-se bastante eficiente na remoção de SST (sólidos suspensos totais), DBO e DQO.

Bof (1999) estudou o desempenho da associação em série de um reator UASB e um BF, e concluiu que o conjunto é uma excelente opção para o tratamento de esgotos sanitários, em nível secundário. Foi observado pelo autor que o sistema se mostrou eficiente na remoção de matéria orgânica e em relação aos ovos de helmintos, que não foram detectados no efluente final, entretanto, o sistema não foi capaz de produzir um efluente bacteriologicamente seguro.

Em sua configuração, o reator UASB possui fluxo ascendente, ocorrendo uma estratificação nas camadas de lodo ao longo de sua altura. No fundo do reator encontra-se o lodo mais denso com partículas granulares que sedimentam facilmente, camada denominada leito de lodo, em que as concentrações de sólidos estão na faixa de 4 a 10%. Próximo ao topo do compartimento de digestão encontra-se o lodo floculento, ou seja, que possui menor densidade (manta de lodo), com concentrações de sólidos na faixa de 1 a 3% (CRIBARI, 2004).

De acordo com Além Sobrinho (2000), as vantagens desse sistema em relação aos tratamentos biológicos convencionais, são: a possibilidade de substituição dos decantadores primários, adensadores e digestores de lodos pelo próprio reator; a redução, para cerca da metade, da capacidade dos reatores aeróbios de pós tratamento, devido à maior eficiência na remoção da matéria orgânica em relação aos decantadores primários; o menor consumo de energia em relação a um sistema de lodos ativados convencional; custos de implantação e operação inferiores. Ainda, segundo Rocha (2009) os sistemas anaeróbios possuem diversas características favoráveis, como a operação com elevados tempos de retenção de lodo, geralmente maior que 30 dias, e baixos tempos de detenção hidráulica, produzindo um lodo excedente já estabilizado, que pode ser descartado.

Segundo Comparini (2001), os lodos tratados em sistemas de tratamento do tipo digestor anaeróbio e filtro biológico possuem teor de sólidos totais da ordem de 4%.

3.3 SUBPRODUTOS SÓLIDOS DO TRATAMENTO DE ESGOTO

Durante o tratamento de esgoto são gerados alguns subprodutos nas fases sólida, semi-sólida ou líquida, que devem ser tratados e encaminhados à disposição final. Estes subprodutos do tratamento da fase líquida são sólidos grosseiros, areia, espuma e lodo, sendo este último o principal deles, devido ao grande volume e massa gerados (JORDÃO; PESSÔA, 2005; LIMA, 2010).

A produção de lodo em um reator UASB pode variar em função da composição do afluente e das condições operacionais (tempo de detenção hidráulico e temperatura). A Tabela 1 mostra os resultados experimentais obtidos por vários pesquisadores na produção de lodo biológico em reatores tipo UASB, com sistemas em escala piloto ou escala real, tratando esgoto municipal bruto (SILVA, 2007).

Tabela 1 - Produção per capita de sólidos suspensos totais e teor de sólidos e água nos reatores tipo UASB

Referência	Produção de sólidos no lodo biológico (g.SST/hab.d) (a)	Teor de sólidos (gSST/L) (b)	Teor de água no lodo biológico (%) (c)	Quantidade de lodo (L/hab.d) (d) = $\frac{(a)}{b}$
CAMPOS <i>et al.</i> (1999)	15 - 25	-	-	-
LOUWE KOOIMARS <i>et al.</i> <i>apud</i> CAMPOS <i>et al.</i> (1999).	20	-	-	-
HASKONING <i>apud</i> CAMPOS <i>et al.</i> (1999)	10 - 20	50 - 100	90 - 95	0,2
VIEIRA e SOUZA <i>apud</i> CAMPOS <i>et al.</i> (1999)	22	72	93	0,31
HASKONING <i>et al.</i> <i>apud</i> CAMPOS <i>et al.</i> (1999)	15	60 - 80	93	0,21
VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994	16	50 - 75	93	0,26

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

A geração do lodo nos sistemas de tratamento do esgoto ocorre, essencialmente, por causa da remoção da matéria orgânica presente. Além disso, as características químicas, físicas e microbiológicas dos lodos dependem dos processos adotados no seu tratamento. Diferentes processos de tratamento do esgoto e dos subprodutos geram diferentes tipos e volumes de lodos. Assim, suas características podem variar em curtos períodos de tempo, devido à variação do esgoto afluente e do desempenho do processo de tratamento.

3.4 CARACTERÍSTICAS DOS LODOS DE ESGOTO

A ABNT classifica o lodo de esgoto como resíduo sólido, Classe IIA – não inertes, isto é, resíduos que podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Na definição de resíduos sólidos apresentada na NBR 10.004 (ABNT, 2004a), estão incluídos, entre outros materiais, os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e os gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição. Devido a isso, devem ser gerenciados conforme exigências dos órgãos regulamentadores específicos para esse tipo de material.

3.4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS

Conforme exposto por Comparini (2001, p. 10):

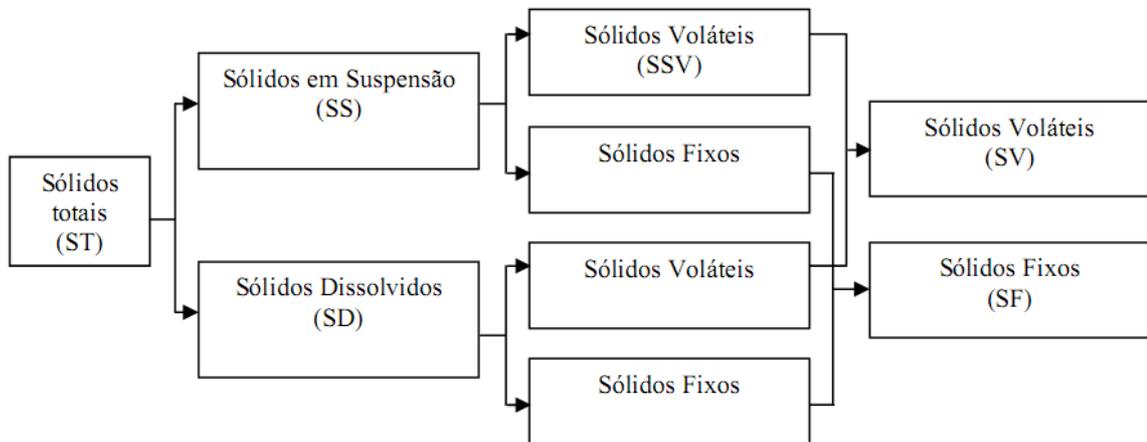
A característica física de maior importância dos lodos, relacionada à utilização ou disposição, é o teor de sólidos, ou, em contraposição, sua umidade. Quanto maior o teor de sólidos, menores as quantidades a serem armazenadas, transportadas e dispostas. Lodos na forma líquida, com teores de sólidos até cerca de 10%, podem ser transportados por meio de tubulações ou caminhões tanque. Lodos que passam por processos de desidratação ou desaguamento, com teores de sólidos variando, em geral, de 20 a 60%, podem ser transportados em caminhões do tipo caçamba basculante.

Os lodos brutos (sem tratamento) possuem, normalmente, de 88% a 99,75% de umidade, ou seja, contêm de 12% a 0,25% de sólidos totais (ST), com consistência líquida ou semisólida, dependendo do processo adotado no tratamento do afluente (TCHOBANOGLOUS; BURTON; STENSEL, 2003).

Os sólidos do lodo são classificados por tamanho e fração orgânica. Em relação ao tamanho das partículas são divididos em sólidos em suspensão (SS) e sólidos dissolvidos (SD) e, são classificados em sólidos fixos ou inorgânicos (SF) e sólidos voláteis ou orgânicos (SV) devido ao teor de matéria orgânica (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001). A distribuição dos sólidos no lodo é representada

pela Figura 1.

Figura 1 - Distribuição dos sólidos do lodo segundo tamanho e fração orgânica



Fonte: Andreoli; Von Sperling; Fernandes (2001).

De acordo com Andreoli; Von Sperling; Fernandes (2001, p. 87):

A relação entre os sólidos voláteis e os sólidos totais indica a fração orgânica dos sólidos do lodo, e o nível de digestão no lodo. A fração volátil do lodo digerido (SV/ST) situa-se entre 0,60 e 0,65, enquanto lodos não digeridos apresentam valores de SV/ST entre 0,75 e 0,80.

A relação entre o teor de sólidos totais e a umidade do lodo se relaciona de acordo com a Equação 1:

$$\text{Umidade (\%)} = 100 - \text{Sólidos totais (\%)} \quad (1)$$

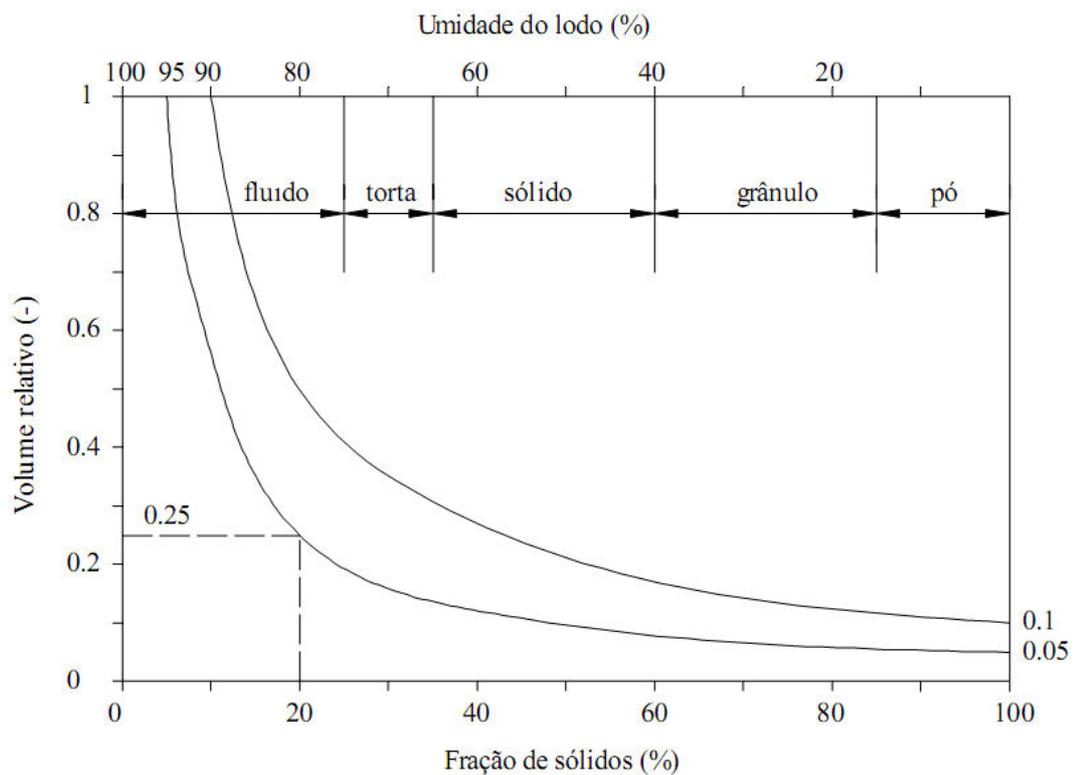
Assim, uma amostra de lodo com umidade de 80% possui teor de sólidos de 20%. Com isso, em cada 100 kg do lodo, 80 kg são de água e 20 kg são de sólidos. Se esse lodo for disposto em 1 m² de área, corresponderá a uma carga de 20 kgSST.m⁻² (MELO, 2006).

A importância da umidade está diretamente relacionada com as propriedades

mecânicas do lodo, pois influencia no manuseio e na disposição final (MELO, 2006). Com a perda de água, o volume de lodo pode ser reduzido a até 10% do seu volume inicial, dependendo apenas do teor de sólidos totais e do processo de remoção de umidade utilizado. Com a redução do volume de lodo torna-se menos onerosa a logística de disposição ou aplicação do mesmo, particularmente devido aos custos de transporte.

A relação entre as variáveis que caracterizam o lodo quanto à sua consistência pode ser vista na Figura 2.

Figura 2 - Relação entre o volume de lodo e sua umidade ou fração de sólidos



Fonte: van Haandel; Lettinga (1994).

Outro aspecto de importância para a escolha da destinação final do lodo está relacionado à sua composição química. Dados típicos dessa composição são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química típica de lodos brutos e lodos digeridos

Constituinte	Lodos primários não tratados		Lodos primários digeridos	
	Faixa	Típico	Faixa	Típico
Sólidos totais (ST) - %	2,0 – 8,0	5,0	6,0 – 12,0	0,83 – 1,16
Sólidos voláteis (%ST)	60 – 80	65	30 – 60	59 – 88
Graxas e gorduras solúveis (%ST)	6 - 30	-	5 - 20	-
Proteínas (%ST)	20 – 30	25	18	32 – 41
Nitrogênio (N, %ST)	1,5 – 4,0	2,5	3,0	2,4 – 5,0
Fósforo (P ₂ O ₅ , %ST)	0,8 – 2,8	1,6	2,5	2,8 – 11,0
Potássio (K ₂ O, %ST)	0,1	0,4	1,0	0,5 – 0,7
Celulose (%ST)	8,0 – 15,0	10,0	10,0	-

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous; Burton; Stensel (2003).

Com relação à densidade do lodo, Lima (2010) ressalta que o valor para o lodo bruto aproxima-se ao da água devido a composição do mesmo constituir-se de uma parcela significativa de água e baixa concentração de sólidos totais. No caso do lodo secundário anaeróbico, o valor da densidade está na faixa de 1,02 a 1,03.

3.4.2 CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS

3.4.2.1 Principais grupos de microorganismos presentes no lodo

A contaminação microbiológica do lodo está originariamente ligada ao material fecal presente no esgoto, logo está diretamente relacionada às características epidemiológicas da população local e dos efluentes lançados na rede coletora, existindo no esgoto bactérias, vírus, fungos e parasitas (helmintos e protozoários). Apesar da maioria desses organismos encontrados no esgoto serem apenas habitantes do trato intestinal, também são encontrados grupos de patogênicos perigosos, que causam

males representativos a saúde humana e animal (MALTA, 2001).

Lançados no esgoto esses microorganismos tendem ao decaimento, já que o esgoto não se caracteriza como o seu meio ideal. O tratamento de esgoto elimina muitos deles, resultando em redução substancial na concentração de patógenos na fase líquida que são transferidos para a fase sólida (lodo). Esta concentração é devida à capacidade de adsorção dos flocos e ao peso específico mais alto de vários microorganismos, principalmente ovos de helmintos que possuem peso específico frequentemente maiores que 1g/cm^3 , resultando em sua sedimentação juntamente com o lodo (MALTA, 2001; CHERUBINI *et al.*, 2002). Assim, o lodo se torna um concentrador dos microorganismos presentes no esgoto.

Segundo Silva (2007), a mais importante forma de contaminação de animais e humanos por patógenos é a via oral sendo que, não podem ser descartadas as vias nasal e cutânea.

Normalmente, não há nos esgotos um único organismo que sirva como indicador de todos os demais grupos presentes. Estudos epidemiológicos demonstram que dentre os organismos encontrados em esgotos brutos, águas tratadas e lodos, as bactérias e os ovos de helmintos representam os agentes de maior risco para a saúde pública e por isso merecem maior atenção (PASSAMANI, 2001).

Os riscos à saúde em relação aos ovos de helmintos devem-se aos seguintes fatos (GALVÁN; DE VICTORIA E ROJAS, 1998; THOMAZ-SOCCOL, 1998 *apud* PASSAMANI, 2001):

- os helmintos apresentam ampla distribuição geográfica;
- diferentes populações do mundo apresentam alta taxa de parasitismo;
- os ovos de helmintos sobrevivem por muito tempo no meio externo;
- apenas 1 ovo viável é suficiente para causar parasitismo;
- o hospedeiro não adquire imunidade, podendo ser contaminado várias vezes;

- os sistemas convencionais de tratamento de esgoto não os removem totalmente;
- o ovo possui um período de embrionamento no solo antes de alcançar o hospedeiro, podendo tornar-se viável com grande potencial infectivo;
- os ovos são persistentes no meio externo, com um período de latência que varia de acordo com a espécie;
- não dependem de hospedeiro intermediário para completar o seu ciclo biológico.

Conforme Silva (2007), a contaminação do homem por *Salmonella sp.* ocorre por meio da ingestão de alimentos ou água contaminados de fezes animais, provocando intoxicações alimentares e gastroenterites, apresentando sintomas clínicos de diarreia, vômitos e dores abdominais.

Em relação aos coliformes termotolerantes, podem ser caracterizados como um subgrupo das bactérias coliformes capazes de se desenvolverem em temperaturas de $44,5 \pm 0,5$ °C, ocorrendo restritamente nas fezes humanas e de animais de sangue quente, particularidade que os torna bons indicadores de contaminação fecal (CEBALLOS, 1998 apud PASSAMANI, 2001).

As infecções causadas por vírus são consideradas de baixo risco pois podem ser transmitidas facilmente por outras vias, principalmente onde existem baixas condições sanitárias e de higiene pessoal, além do que, geralmente, conferem imunização significativa (PASSAMANI, 2001). Podem ser citados, segundo Silva (2007), os vírus da Hepatite A que causam a hepatite infecciosa e os enterovírus que são causadores de meningite, encefalite, doenças respiratórias, conjuntivite hemorrágica aguda e febre.

Ainda, segundo Passamani (2001), a existência de patógenos nas águas residuárias não provoca necessariamente a contaminação do ser humano, mas permite direta ou indiretamente a exposição do homem às doenças.

A Resolução n° 375 do Conama (BRASIL, 2006) exige que o controle para aplicação de

lodo de esgoto no solo seja exercido sobre coliformes termotolerantes, *Salmonella sp*, ovos viáveis de helmintos e vírus entéricos, os quais, poderão estar presentes no lodo a ser disposto, respeitando o limite estabelecido.

O número de organismos pode ser reduzido em processos específicos, como na digestão anaeróbia, na estabilização química e na secagem térmica. A Tabela 3 apresenta as diferenças de concentrações de alguns microorganismos no lodo bruto e digerido.

Tabela 3 - Alguns microorganismos do lodo

Tipo	Lodo Bruto / 100mL	Lodo Digerido / 100mL
Vírus	$2,5 \times 10^3 - 70 \times 10^3$	$10^3 - 10^4$
Coliformes Fecais	10^9	$30 \times 10^3 - 6 \times 10^6$
<i>Salmonella sp.</i>	8×10^3	30 – 62
<i>Ascaris Lumbricoides</i>	$2 - 10^4$	0 - 10^3

Fonte: Jordão; Pessôa (2005).

O grupo dos nematóides possuem um corpo cilíndrico longo e geralmente não possuem órgãos especializados de fixação. Esses parasitas possuem sexos separados e, alguns liberam larvas em estágio inicial de desenvolvimento diretamente no hospedeiro e não somente ovos fertilizados. São exemplos de nematóides comumente encontrados em fezes humanas: *Ancylostoma*, *Ascaris*, *Enterobius*, *Strongyloides*, *Toxocara* (COMPARINI, 2001). Os nematóides apresentam alta incidência na população, sendo os *Ascaris lumbricoides* encontrados no percentual de 2% a 80% da população, de acordo com a classe social e a região do Brasil (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

A estrogiloidíase é a infecção do intestino fino causada pelo nematóide *Strongyloides stercoralis*, que possui ovos ou larvas que podem infectar o homem ou animais jovens logo após serem eliminados nas fezes. Na maioria dos casos os pacientes não apresentam sintomas, sendo que a infecção pode tornar-se séria em indivíduos mal

nutridos e com respostas de imunidade deficientes (COMPARINI, 2001). A fêmea adulta habita a mucosa do intestino fino sendo o menor nematóide parasita do homem.

A ancilostomose (amarelão) pode ser causada tanto pelo *Ancylostoma duodenale* quanto pelo *Necatur americanus*. O contágio ocorre através do contato com fezes ou esgoto contaminado, caso em que as larvas filarióides penetram ativamente através da pele ou ainda, pela ingestão de alimentos crus contaminados. As pessoas portadoras apresentam palidez, pois os vermes habitam o intestino delgado e, com suas placas cortantes ou dentes, rasgam as paredes intestinais provocando hemorragias e anemia (CASTRO; BEYRODT, 2003).

3.4.2.2 Sobrevivência dos microorganismos no ambiente

A tabela 4 mostra o tempo de sobrevivência de alguns patógenos no solo e na superfície das plantas após a aplicação do biossólido.

Tabela 4 - Tempo de sobrevivência de patógenos no solo e plantas

	Solo		Plantas	
	Máximo absoluto	Máximo usual	Máximo absoluto	Máximo usual
Bactérias	1 ano	2 meses	6 meses	1 mês
Vírus	1 ano	3 meses	2 meses	1 mês
Cistos de protozoários	10 dias	2 dias	5 dias	2 dias
Ovos de helmintos	7 anos	2 anos	5 meses	1 mês

Fonte: US EPA (2003).

A temperatura e o tempo de exposição são fatores importantes para determinar formas experimentais na eliminação de patógenos do lodo. A Tabela 5 apresenta, para alguns microorganismos, a temperatura letal e o tempo de exposição para a eliminação da espécie do meio ambiente.

Tabela 5 - Temperatura e tempo de exposição requeridos para a destruição de alguns patógenos e parasitas comuns

Organismo	Condição – Tempo de exposição	Temperatura letal (°C)
<i>Salmonella sp.</i>	Morte 30 min. 20 min.	55 – 60 > 60
<i>Escherichia coli</i>	Morte 60 min. 20 min.	55 >60
<i>Shigella sp.</i>	Morte 60 min.	55
<i>Taenia saginata</i>	Poucos min.	55
Ovos de <i>Ascaris lumbricoides</i>	Morte < 60 min.	> 50

Fonte: Tchobanoglous; Burton; Stensel (2003).

Os helmintos, principalmente seus ovos, são os parasitas que têm a maior resistência às condições ambientais externas. Sua resistência, variabilidade e complexidade podem ser entendidas como adaptações para aumentar a sobrevivência do embrião e da larva no meio ambiente. A casca dos ovos de nematóides pode ser constituída de 1 a 5 camadas, sendo uma interna lipídica, uma média quitinosa e uma externa vitelina (WHARTON, 1980 *apud* SILVA, 2007). Os ovos de *Ascaris sp.* são um dos mais resistentes dos patógenos encontrados no lodo, sendo capazes de sobreviverem por até sete anos no solo (ROCHA, 2009).

Alterações na temperatura do ambiente determinam a taxa de perda de água dos ovos de nematóides presentes no local. Desse modo, o efeito da temperatura sobre a permeabilidade da casca do ovo é um fator relevante de influência na capacidade dos ovos em resistirem às características adversas do meio ambiente. Segundo Wharton (1979, *apud* SILVA, 2007) quando os ovos são expostos à dessecação em temperaturas constantes diferentes, a taxa de perda de água aumenta exponencialmente, em função do aumento da temperatura. E, de acordo com Barrett (1976, *apud* PECSON; NELSON, [198-?]), em uma exposição suficientemente longa ao calor, a membrana lipídica resiliente do ovo começa a perder a sua integridade, tornando o ovo vulnerável aos efeitos osmóticos ou produtos químicos presentes no meio externo.

Ainda de acordo com Comparini (2001), os ovos de *Strongyloides estercoralis* não são

encontrados no ambiente, podendo ser encontrados em lodos e esgotos de áreas endêmicas, enquanto suas larvas vivem por um período aproximado de 3 semanas, mesmo em solos sob condições ótimas de umidade e temperatura (entre 20 e 25°C).

Os ovos de *Ancylostoma duodenale* não sobrevivem por muito tempo em condições tropicais, sendo que em temperaturas abaixo de 10 °C e acima de 40°C o desenvolvimento das larvas não ocorre. De acordo com Comparini (2001, p. 134), “em Colombo, Sri Lanka, os ovos não puderam ser reconhecidos microscopicamente após 43 dias em lodos a 27°C, e não puderam ser cultivados após 23 dias”.

O tempo de sobrevivência de protozoários e bactérias no meio ambiente é bem menor do que o de ovos de helmintos, e ainda é necessária uma elevada densidade para causar infecções.

Conforme exposto, os ovos de *Ascaris* são os melhores indicadores da contaminação por helmintos tendo em vista que os ovos de *Strongyloides* e de *Ancylostoma* são destruídos muito mais rapidamente no ambiente.

3.5 TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO

Segundo Comparini (2001), previamente à disposição ou à utilização, uma grande quantidade de processos de tratamento pode ser usada para alterar as propriedades dos lodos. Basicamente, esses processos têm como objetivo a redução de volume, a estabilização e a inativação de agentes patogênicos presentes.

3.5.1 PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO DO LODO

De acordo com Lima (2010), os processos de estabilização têm como objetivo reduzir as concentrações de matéria orgânica biodegradável (sólidos voláteis), atenuando os maus odores no tratamento e no manuseio do lodo. Além disso, a estabilização reduz a concentração de patógenos do lodo, podendo ser por meios biológico, químico ou térmico (ROCHA, 2009).

Lima (2010) cita os seguintes processos de estabilização do lodo: digestão anaeróbica; digestão aeróbica; tratamento térmico; estabilização química e compostagem.

Segundo Rocha (2009), a estabilização biológica pode ser realizada por meio de digestão anaeróbia (processo utilizado neste trabalho) ou aeróbia do lodo líquido, produzindo um lodo que pode ser utilizado com restrições na agricultura, como adubo orgânico e condicionador do solo. Para o uso irrestrito na agricultura é necessário um pós-tratamento por higienização.

Na digestão anaeróbia, a matéria orgânica contida no lodo é degradada por meio de processos metabólicos fermentativos, com a formação de produtos gasosos estáveis como o metano e o dióxido de carbono (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003). As bactérias anaeróbias responsáveis por essa degradação são dos tipos fermentativas, acetogênicas e metanogênicas.

Lawler *et al.* ([198-?]), *apud* Ramaldes (2001), chegaram a conclusão de que um lodo bem digerido tem uma maior capacidade de desidratação. A digestão anaeróbia tem ação sobre a distribuição do tamanho das partículas e, quando a digestão é eficaz, partículas de todos os tamanhos são destruídas. Entretanto, prioritariamente, ocasiona remoção das partículas menores, produzindo, desse modo, uma diminuição de área específica e, conseqüentemente, um aumento na desidratação. De modo contrário, se a digestão não é eficiente, as partículas maiores são destruídas gerando um maior número de partículas menores que interferem negativamente no processo de desidratação.

A digestão anaeróbia e a digestão aeróbia são capazes de reduzir os níveis de organismos patogênicos existentes no lodo, no entanto a etapa de higienização é necessária porque muitos parasitos intestinais e seus ovos não são destruídos por processos de digestão convencional. A etapa de higienização objetiva reduzir a concentração de microrganismos patogênicos, evitando a transmissão de doenças e de riscos às pessoas que trabalham diretamente com o lodo, e ainda impedir impactos ambientais negativos (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

A estabilização alcalina, também conhecida no Brasil como caleação, consiste na aplicação de um composto químico alcalino, em geral cal virgem (óxido de cálcio – CaO) ou cal hidratada (hidróxido de cálcio – Ca(OH)₂) (ANDREOLI, 2001; ANDREOLI *et al.*, 2001). A adição desses compostos no lodo produz reações exotérmicas, com liberação de calor, e também aumento de pH. A cal é aplicada em proporções em torno de 30 a 50% de peso seco do lodo, sendo que este deve conter teor de umidade mínimo de 65-70%, de modo a otimizar a reação (FERNANDES, 1999).

De acordo com Dias (2012), a estabilização química é um processo de higienização muito eficiente, entretanto, gera despesas relativas à compra e transporte de cal virgem, somando-se ainda a desvantagem do incremento de volume de lodo e, portanto, de custos com transporte e disposição final.

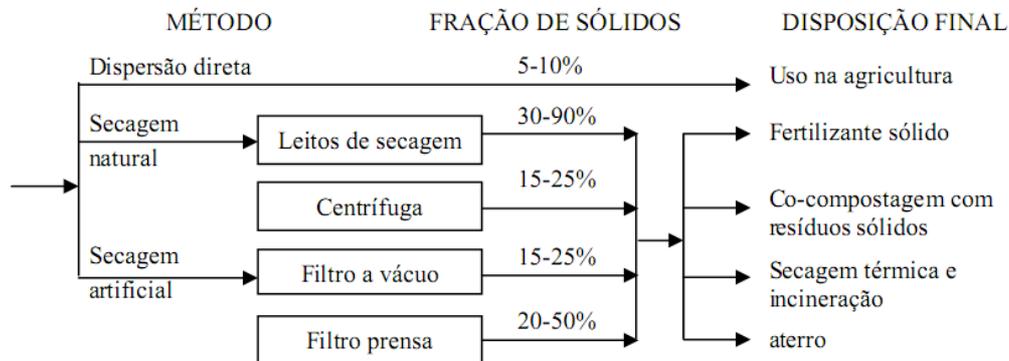
3.5.2 REMOÇÃO DA UMIDADE DO LODO

A desidratação do lodo pode ser realizada através de processos naturais ou mecânicos. Os processos naturais podem utilizar-se de leitos de secagem, lagoas de lodo e disposição do lodo no solo, características que os tornam dependentes do clima, favorecendo sua adoção em regiões quentes (SILVA, 2007). Parâmetros como temperatura, umidade do ar, ventilação e viscosidade do lodo, afetam o método de desidratação natural (CORDEIRO, 1999).

Alguns métodos de secagem de lodo são indicados na Figura 3, com as respectivas frações finais de sólidos e tipos de disposição final do lodo.

A efetividade do processo de secagem do lodo ao ar depende muito do clima local: a secagem ocorre mais rapidamente e mais completamente em clima quente e seco, e mais lentamente em tempo frio e úmido. Durante o período de secagem/armazenamento no leito de secagem, o lodo de esgoto passa por transformações físicas, químicas e biológicas, incluindo a decomposição biológica da matéria orgânica, produção de amônia e desidratação (US EPA, 2003).

Figura 3 - Alguns métodos de secagem e disposição final do lodo



Fonte: Van Haandel; Lettinga (1994).

É aconselhável garantir que os leitos de secagem sejam expostos a atmosfera e que o lodo de esgoto seja parcialmente digerido antes da secagem ao ar. Sob essas condições, o ar seco irá reduzir em 100 vezes a densidade de bactérias e em 10 vezes a densidade de vírus patogênicos. Ovos viáveis de helmintos também serão reduzidos, com exceção de algumas espécies resistentes (US EPA, 2003).

A incidência de raios solares colabora para reduzir o tempo de sobrevivência dos parasitos (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001). Com a diminuição da umidade do lodo, diminui também a possibilidade de vida de alguns microrganismos de veiculação hídrica, que têm na água seu meio de locomoção e reprodução.

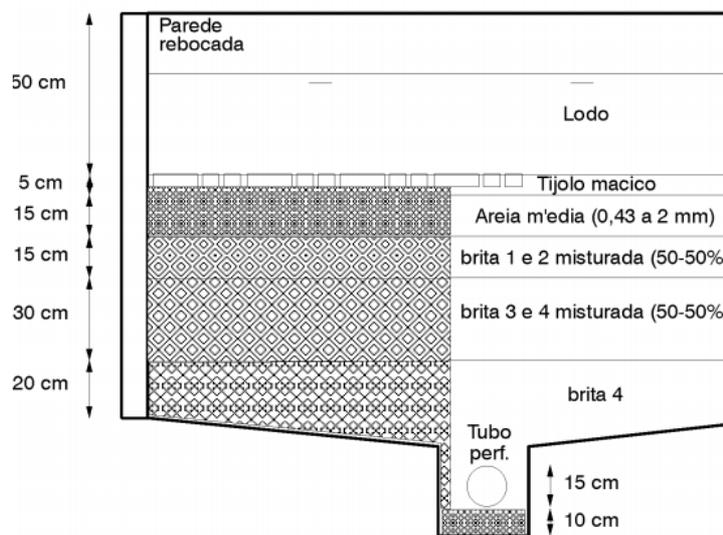
3.5.2.1 Desaguamento do lodo em leitos de secagem

Os leitos de secagem são unidades de tratamento construídas em forma de tanques retangulares com a finalidade de receber o lodo dos digestores, anaeróbio ou aeróbio, sendo o sistema mais comum de preparação do lodo digerido para a destinação final, que, dependendo do tipo de tratamento e das características climáticas locais, poderá ser utilizado como fertilizante na agricultura (JORDÃO; PESSÔA, 2005; MELO, 2006).

Segundo Melo (2006), o leito de secagem é constituído de camada de areia sobre as de brita, sendo o fundo plano e impermeável, com uma ligeira declividade para os tubos

drenos, que de acordo com a ABNT (2011) devem ter diâmetro mínimo de 100 mm. A distinção e a disposição dos materiais utilizados na construção de leitos de secagem podem ser vistas na Figura 4.

Figura 4 - Seção de um leito de secagem de lodo



Fonte: Melo (2006).

Segundo Jordão e Pessoa (2005), os leitos de secagem podem ser caracterizados pelas seguintes partes: tanques de armazenamento, camada drenante e cobertura.

Os tanques podem ser construídos em alvenaria, concreto ou terra (diques). Podem ainda ser cobertos ou, comumente, ao ar livre.

A camada drenante é constituída por camada suporte, meio filtrante e sistema de drenagem, descritos a seguir.

- A camada suporte normalmente é constituída de tijolos recozidos, assentados em níveis, com afastamento de 2 a 3 cm, preenchido com areia grossa. O modo de disposição dos tijolos deve facilitar a remoção do lodo e a reposição de tijolos defeituosos.
- O meio filtrante é constituído por camadas de pedras de granulometrias

diferentes, arrumadas de modo que a camada inferior tenha granulometria maior do que a da camada superior.

- O sistema de drenagem é constituído de tubos perfurados dispostos abaixo do meio filtrante, drenando o líquido percolado através das camadas superiores. O líquido drenado geralmente retorna ao processo de tratamento, entretanto, quando o corpo receptor permitir, poderá ser lançado juntamente com o efluente final da estação (JORDÃO; PESSÔA, 2005).

O leito de secagem pode ser tanto descoberto quanto coberto. A cobertura, que pode ser feita de vidro ou plástico, serve para proteger o lodo da ação da chuva, podendo ainda, dependendo da configuração, auxiliar na higienização do lodo, provocada pela elevação da temperatura (MELO, 2006).

O funcionamento dos leitos de secagem é fundamentado em um processo natural de perda de umidade que se desenvolve devido aos seguintes fenômenos (JORDÃO; PESSÔA, 2005):

- 1 Liberação dos gases dissolvidos ao serem transferidos do digestor (pressão elevada) e submetidos à pressão atmosférica nos leitos de secagem;
- 2 Liquefação, devido à diferença do peso específico aparente do lodo digerido e da água, estabelecendo a flotação do lodo e rápida drenagem da água;
- 3 Evaporação natural da água devido ao contato íntimo com a atmosfera; e
- 4 Evaporação devido ao poder calorífico do lodo.

O tempo total do ciclo de secagem de lodo num leito (T_t) se compõe de quatro períodos sequenciais diferentes:

1. T_1 : tempo para preparação do leito e descarga do lodo;
2. T_2 : tempo de percolação;
3. T_3 : tempo de evaporação para se atingir a umidade desejada e;

4. T4 : tempo de remoção dos sólidos secos.

Os períodos T2 e T3 são dependentes das condições operacionais durante a secagem, condições meteorológicas, tipo de lodo e carga aplicada (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994).

Em condições climáticas normais, o lodo poderá ser removido do leito de secagem após um período de 12 a 20 dias, com a umidade em torno de 70 a 60%. Em experiências realizadas na ETE da Penha – Rio de Janeiro, o lodo com umidade média de 95% foi disposto em leitos de secagem e após 20 dias atingiu umidade média de 50%. Na ETE Cabanga, Recife, tempos de aproximadamente 15 dias foram suficientes para alcançar um teor de umidade de 60 a 70% (JORDÃO; PESSÔA, 2005).

Em estudos desenvolvidos por Borges *et al.* (2009) em leitos de secagem, o lodo tratado termicamente (com queima do biogás) apresentou rendimento de desaguamento bem inferior ao do lodo *in natura*. A taxa de secagem do lodo diminuiu e, conseqüentemente, o tempo de secagem do lodo aumentou proporcionalmente ao aumento da carga de sólidos aplicada ao leito. Considerando um período de secagem de sete dias, foram alcançados teores de sólidos do lodo *in natura* de 33,7% e 22,2%, para cargas de 5 e 10 kgSST.m⁻², respectivamente. Para o lodo tratado termicamente, foram alcançados teores de sólidos de 12,4 e 7,9%, respectivamente, para o mesmo período e cargas, ou seja, concentrações cerca de três vezes menores (BORGES *et al.*, 2009).

A capacidade de desaguamento do lodo relaciona-se diretamente ao tipo de sólido e à forma como a água está ligada às partículas sólidas (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001). Desse modo, o período de secagem e a remoção da umidade do lodo estão relacionados às quatro categorias de água que podem estar presentes no lodo: água livre, que pode ser removida por gravidade; água intersticial, que está presente nos espaços intersticiais dos flocos; água vicinal, que por adsorção e adesão fica presa na superfície das partículas sólidas; e água de hidratação que se encontra quimicamente ligada às partículas sólidas, sendo as duas últimas categorias tipos de água não removível (VESILIND, 1995 *apud* LIMA, 2010).

3.5.2.2 Monitoramento de variáveis meteorológicas

Vários fatores ambientais como, principalmente, chuvas, umidade relativa do ar, radiação solar e ventos influenciam o desaguamento do lodo em leitos de secagem convencionais (CAMPOS *et al.*, 1999). O tempo de permanência do lodo nos leitos será determinado prioritariamente pelo clima da região, de modo que seu ciclo será prolongado em regiões de umidade relativa do ar elevada, precipitação intensa e temperatura ambiente amena (DALTRO FILHO *et al.*, 1994 *apud* CHERUBINI *et al.*, 2002).

Em trabalho desenvolvido por Cherubini *et al.* (2002), as variáveis meteorológicas monitoradas nos meses de condução do experimento de higienização do lodo em leitos de secagem foram: temperatura ambiente, precipitação, umidade relativa do ar, radiação solar e irradiação solar. Os resultados obtidos no trabalho mostraram correlações significativas para as variáveis monitoradas quando relacionadas ao teor de sólidos no lodo de esgoto, comprovando que a ação climática do ambiente interfere na concentração final de sólidos do lodo. Como consequência, quanto mais elevada a umidade relativa do ambiente e a precipitação na região, menor a concentração de sólidos no lodo. Em regiões de temperatura e índice de radiação solar altos, a concentração de sólidos no lodo será maior em períodos de tempo mais curtos. Um dos resultados obtidos por Cherubini *et al.* (2002) mostrou que a camada superficial do perfil apresentou um teor de sólidos maior quando comparada à camada inferior, fato relacionado à maior exposição da camada superficial aos raios solares e ventos, como também pela própria ação da gravidade, fator determinante na percolação natural da água para camadas mais profundas do perfil.

Em estudo de desidratação de lodos de UASB em leito de secagem realizado por Alem Sobrinho e Samudio (1996), os fatores climáticos monitorados foram pluviometria, evaporação, temperatura e umidade relativa do ar. Os resultados encontrados no estudo apontaram que lodos de reator UASB aplicados em leitos de secagem, com concentração de sólidos superior a 3-3,5% desidratam bem, com cargas de sólidos aplicadas de até 15 kgSST.m⁻².ciclo, para ciclos de 16 dias de duração, mesmo com precipitação pluviométrica acumulada no período (50 mm). O teor de sólidos alcançado

na torta seca foi de 20% após 16 dias de secagem e de 30% após 30 dias.

3.5.2.3 Cobertura de leitos de secagem

Segundo Jordão e Pessoa (2005), não há necessidade do uso de cobertura dos leitos de secagem em países tropicais, pois além do custo, a secagem do lodo digerido não é afetada pelas chuvas, visto que a porosidade da massa de lodo em processo de secagem auxilia na percolação da água da chuva que é retirada pelo sistema de drenagem.

No entanto, segundo Borges *et al.* (2009) o processo de secagem do lodo nos leitos é fortemente influenciado pela temperatura ambiente e pela umidade relativa do ar. Sendo este sistema de secagem composto por dois processos físicos distintos, ou seja, evaporação e drenagem, estas operações são fortemente afetadas pelo clima e pela estação do ano, podendo o processo de secagem levar de algumas semanas a alguns meses (ANDREOLI *et al.*, 2000). Esses fatores ambientais podem ser controlados por meio de práticas como cobertura do leito que pode agilizar na secagem do lodo (ANDREOLI *et al.*, 2000).

Em estudo desenvolvido por Cherubini *et al.* (2002), a carga de sólidos utilizada (34,5 kgSST.m⁻²) para os leitos de secagem apresentou maior concentração de sólidos para o tratamento Testemunha (Leitos de secagem sem cobertura - 47%) do que para o tratamento de solarização (coberto com filme plástico transparente sem espaço para ventilação - 36%), portanto com superioridade no desaguamento. De acordo com os autores esse fato é devido à facilidade de evaporação, que ocorreu de forma mais intensa porque o tratamento testemunha não contou com o impedimento à evaporação, causado pelo filme plástico sobre o lodo nos períodos de solarização dos respectivos tratamentos.

Ramaldes (2001) em estudo desenvolvido com pilotos de leitos de secagem para desidratação de lodo de esgoto utilizou-se de uma cobertura plástica transparente para evitar a contribuição de água da chuva, pois no campo da ETE experimental não havia

uma base meteorológica para fornecer os índices de precipitação e evaporação. Como resultado geral da avaliação da metodologia utilizada, foi relatado que o ensaio de percolação para taxas de aplicação acima de 48kgSST.m^{-2} foi desfavorecido pelo efeito de coluna que dificulta a troca de vapor de água na superfície do lodo e também pela cobertura de plástico que impedia a contribuição da água pluvial e dificultava a ventilação na parte superior do leito de secagem. Ramaldes (2001) destaca ainda que o efeito de evaporação certamente existiu, mas não foi significativo, sendo esta uma das restrições da metodologia para longos períodos de percolação.

3.5.3 REMOÇÃO DE MICROORGANISMOS DO LODO – HIGIENIZAÇÃO

De acordo com Malta (2001, p. 25):

O gerenciamento da sanidade do lodo, caracterizado pelos principais agentes patogênicos, tais como ovos de helmintos, cistos de protozoários, colônias de bactérias e alguns vírus, é realizado através de métodos de higienização, que devem ser econômicos, seguros e de aplicação prática.

Os principais processos de remoção de patógenos do lodo de esgoto são a compostagem, que elimina os agentes patogênicos através da temperatura; a calagem, que associa a ação de altos níveis de pH ao calor gerado pelas reações químicas de hidratação da cal; a secagem, que reduz os patógenos pela exposição aos raios solares ou ao calor; o uso da radiação gama e a pasteurização (US EPA, 2003).

Segundo Zaleski *et al.* (2005) existem vários métodos para reduzir os níveis de patógenos em bio sólidos antes da aplicação no solo, incluindo o uso de leitos de secagem expostos ao sol e a compostagem. Tratamentos, tais como o uso de leitos de secagem expostos ao sol, deve reduzir o teor de água e remover patógenos, mas há possibilidades de um número reduzido de patógenos sobreviver a esse processo e, posteriormente, voltar a crescer a níveis perigosos quando expostos a condições ambientais favoráveis.

Arthurson (2008) cita que os procedimentos de estabilização com cal, compostagem e

secagem ao calor diferem muito em sua capacidade de reduzir o conteúdo de microorganismos patogênicos no lodo de esgoto, porém, geralmente, todos esses reduzem os teores de matéria orgânica e água e a emissão de odores desagradáveis.

Como, geralmente, não é finalidade dos processos de higienização a esterilização do lodo, os níveis remanescentes de contaminação podem ser compensados com restrições de uso. Para isso, são criadas situações de exposição dos agentes patogênicos a condições ambientais que dificultam a sua sobrevivência ou impede-se o contato direto do lodo com os produtos que serão produzidos. O solo possui características que o torna um meio bastante adverso à sobrevivência destes agentes (ANDREOLI; LARA; FERNANDES, 1999).

Estudos anteriores foram realizados por Yeager e Ward (1981) com a finalidade de determinar a influência do teor de umidade do lodo nas taxas de inativação de bactérias durante o armazenamento a longo prazo, bem como no potencial de recrescimento bacteriano. Os resultados demonstraram que o crescimento bacteriano em amostras de lodo com teor de sólidos menor que 75%, ou seja, teor de umidade maior que 25%, foi rápido para todos os organismos estudados (*Streptococcus faecalis*, *Proteus mirabilis* e *Salmonella typhimurium*), ao passo que nenhum crescimento foi observado em amostras com teor de sólidos acima de 85%. Com teor de 80% de sólidos, o crescimento ocorreu em algumas amostras de lodo, mas a um ritmo muito mais lento do que o encontrado em amostras com maior teor de umidade. Estes resultados sugerem que níveis superiores a 15% de umidade são necessários para o crescimento de alguns, se não todas, as cepas de bactérias entéricas em lodo.

3.5.4 UTILIZAÇÃO DO BIOSSÓLIDO NA AGRICULTURA

Os lodos oriundos do tratamento de esgoto doméstico possuem nutrientes importantes caso a utilização na agricultura seja uma das alternativas de disposição final. Podem conter quantidades consideráveis de muitos elementos essenciais às plantas, como os macronutrientes nitrogênio, potássio, fósforo, magnésio, cálcio, enxofre, bem como os

micronutrientes cobre, zinco, ferro, boro, manganês, molibdênio. Dependendo do tipo de lodo gerado, alguns desses elementos podem apresentar concentrações maiores que as encontradas em vários adubos orgânicos tradicionalmente utilizados na agricultura (MARQUES, 2002).

As diversas maneiras de destinação final de lodos de esgoto estabilizados incluem a incineração, compostagem, disposição em aterro sanitário e utilização como fertilizante na agricultura. O termo biossólido é designado ao lodo gerado em estações de tratamento de esgotos sanitários que foram submetidos ao processo de estabilização biológica e complementarmente, possuem características químicas e biológicas que permitem seu uso de forma benéfica (TSUTIYA, 2002; LIMA *et al.*, 2001). Já o termo lodo de esgoto é dado aos sólidos inadequadamente estabilizados, que geram riscos a sua utilização (WEF, 1991 *apud* MELO, 2006).

Zhang ([200-X]), destaca que não são classificados como biossólidos os resíduos animais, resíduos sólidos municipais, esgoto não tratado, resíduos perigosos ou resíduos industriais não tratados. De acordo com a definição desses autores, biossólidos são materiais recicláveis capazes de melhorar a fertilidade e a estrutura do solo, elevando a produção das culturas hortícolas, agrícolas e florestais.

Vários pesquisadores citados por Barreiros (2005) como Berton *et al.* (1989), Bevacqua e Mellano (1994), Skousen e Klinger (1998), Tsutya (2000), entre outros, relatam que a utilização do biossólido acarreta em melhorias nas propriedades químicas do solo, ou seja, aumentos de pH e da capacidade de troca catiônica, incrementos de matéria orgânica e de macronutrientes como nitrogênio, fósforo e cálcio.

Sob a perspectiva das propriedades físicas, o biossólido pode agir como condicionador de solos, aumentando a agregação das partículas, favorecendo a aeração, a retenção de umidade, diminuindo as perdas por erosão, entre outros (SABEY, 1974; CARVALHO, BARRAL, 1981 *apud* GUEDES, 2005; ZHANG, [200-X]). De acordo com Chagas (2000), os lodos digeridos agregam mais benefícios quanto à fertilidade física do campo do que a sua fertilidade química.

O lodo bem digerido possui um grande número de partículas aglomerantes em sua constituição, como os constituintes húmicos que se degradam lentamente, que tendem a formar compostos estruturais em forma de anéis com íons metálicos que têm capacidade de aglomerar partículas finas do solo, bem como minerais, sais e nutrientes oriundos de fertilizantes químicos, favorecendo a fixação das raízes e a abertura de sulcos na terra (CHAGAS, 2000).

Segundo Guedes (2005), vários trabalhos apresentam ganhos na produtividade de culturas agrícolas (BETTIOL *et al.*, 1982; BOARETTO *et al.*, 1992; ROS *et al.*, 1993; SIMONETE, 2003) e de plantações florestais (WEETMAN *et al.*, 1993; POLGLASE, MYERS, 1995; KAPOSTS *et al.*, 2000; VAZ, GONÇALVES, 2002). Nas atividades agrícolas, a aplicação do biossólido no solo ocasiona a reciclagem de nutrientes para os vegetais, a economia de fertilizantes, acréscimo na produtividade das culturas e, frequentemente, melhoria da fertilidade do solo e do estado nutricional das plantas (GUEDES, 2005).

Segundo Poggiani *et al.* (2000) além do benefício econômico, o uso agrícola de biossólidos também resulta no benefício ecológico com retorno ao campo de parte de nutriente, matéria orgânica e energia exportados para os centros urbanos. A amenização do efeito estufa e a possibilidade de elevação do estoque de carbono no solo são ainda outros importantes benefícios ambientais (GIBSON *et al.*, 2002).

Ainda de acordo com Guedes (2005), do ponto de vista social, a destinação correta do biossólido gera benefício para as grandes cidades, pois possibilita a retirada de um dos resíduos mais problemáticos gerados nas áreas urbanas. Os produtores rurais também podem ser beneficiados através do aumento da produtividade das culturas e economia de fertilizantes, evitando a contaminação de pessoas devido a uma disposição inadequada do lodo.

A adubação de culturas agrícolas e florestais com lodo de esgoto é uma possibilidade, que ocorre em vários países. No Reino Unido, 42% dos biossólidos são reciclados na agricultura (RIDDELL-BLACK, 1998); nos Estados Unidos, 60% (EPA, 1999 *apud* ALMEIDA *et al.*, 2006); na Dinamarca, 70% (DEBOSZ *et al.*, 2002); em Luxemburgo,

90%; na Suíça, 80% e na Holanda, Espanha e Suécia, 60% (SIMON, 1993 *apud* CHAGAS, 2000).

3.6 ASPECTOS LEGAIS

No Brasil, a regulação para o uso e disposição do lodo é a Resolução n° 375 de 2006 do Conama que “define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências” (BRASIL, 2006).

Segundo Rocha (2009, p.67):

Anteriormente a essa data, as experiências e mesmo o uso agrícola do lodo tinha como referência as normas técnicas do CETESB de 1999, intitulada Aplicação de Lodos de Sistemas de Tratamento Biológico em Áreas Agrícolas – Critérios para projeto e operação (Manual Técnico) e também do Manual Técnico da Sanepar de 1997.

Em relação aos indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos, a Tabela 6 mostra as concentrações máximas permitidas de acordo com a Resolução n° 375/2006 do Conama.

Tabela 6 - Concentrações máximas permitidas de indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos para classes A e B de lodo de esgoto

Indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos		
	Classe A	Classe B
Coliformes termotolerantes	< 10 ³ NMP / g de ST	< 10 ⁶ NMP / g de ST
Ovos viáveis de helmintos	< 0,25 ovo / g de ST	< 10 ovos / g de ST
Salmonella sp.	Ausência em 10g de ST	-
Vírus entéricos	< 0,25 UFP ou UFF / g de ST	-

Fonte: BRASIL (2006).

Nota: ST: Sólidos Totais, NMP: Número Mais provável, UFF: Unidade Formadora de Foco, UFP: Unidade Formadora de Placa.

Após cinco anos a partir da data da publicação desta resolução, somente será permitida a aplicação de lodo de esgoto Classe A, exceto sejam propostos novos critérios ou limites baseados em estudos de avaliação de risco e dados epidemiológicos nacionais, que demonstrem a segurança do uso de Classe B.

3.7 PROCESSOS DE HIGIENIZAÇÃO COM O USO DE ENERGIA SOLAR

Em países como o Brasil, que têm predominância do clima tropical e possui incidência de radiação solar elevada praticamente o ano inteiro, é esperado o desenvolvimento de tecnologias que utilizem os raios solares, uma energia limpa, inesgotável e gratuita, como fonte alternativa para a higienização de solos e resíduos orgânicos. No entanto, a eficácia do processo depende do comprimento de onda, de modo que a faixa do ultravioleta possui papel preponderante no efeito bactericida (BERNARDES; CAIXETA; MORAES, 1999).

A técnica da solarização é um processo que foi concebido para o controle de fitopatógenos do solo. O sucesso dessa técnica é devido, principalmente, ao aquecimento do solo úmido, através de um plástico transparente disposto sobre a superfície, sendo as elevadas temperaturas que se alcançam letais à maioria dos patógenos do solo (TSUTIYA, 2002).

Segundo Silva (2007), a solarização é uma técnica simples e de fácil aplicação, além de não requerer alto investimento financeiro e não gerar outros resíduos além do lodo.

No processo de solarização de lodo de esgoto, a redução na concentração de microorganismos patogênicos ocorre através de um processo simples de secagem do lodo com cobertura plástica, que além de ser de baixo custo, busca aproveitar as condições climáticas de alta insolação e temperatura ambiente. O efeito estufa é criado com o recobrimento do lodo com plástico transparente, de espessura reduzida (30 - 50 mm). Os raios ultravioletas atuam na superfície, enquanto, no interior, predomina a oscilação periódica de temperatura durante o tratamento, criando alterações nas

condições químicas, físicas e biológicas do meio. Desse modo, com a diminuição da umidade (não interferência de chuvas) e o efeito estufa proporcionado pelo plástico transparente, o processo de higienização é acelerado (GHINI, 1997 *apud* ARGEL, 2010).

Segundo Silva (2007), o filme plástico transparente promove um efeito estufa através da passagem da radiação solar e sua conversão, em energia calorífica, com isso, são gerados vapores que podem alcançar 50°C, temperatura suficiente para destruir os principais patógenos do lodo, como bactérias, fungos, vírus e nematóides.

Os experimentos realizados com os biossólidos produzidos na estação de tratamento de esgotos de Franca – SP consistiram, basicamente, na disposição do lodo digerido e desaguado (umidade de aproximadamente 80%) em caixas cobertas com lona plástica transparente, com diferentes profundidades do material, fazendo-se ou não o revolvimento periódico. A profundidade que apresentou melhores resultados para inativação de ovos viáveis de helmintos foi a de 5 cm, atingindo até 100% de remoção. A temperatura máxima atingida nas caixas cobertas foi superior a 60°C, com permanência acima de 55°C por mais de 24 horas em testes corridos de 15 dias, porém o tratamento com cobertura apresentou teor de umidade de 79,30%, já a caixa sem cobertura apresentou teor de 9,74%. O teste sem revolvimento foi o que apresentou melhor resultado em relação a inativação de ovos de helmintos (BUENO, 2001).

Ferreira (2001) utilizou a técnica da solarização no Paraná com lodo anaeróbio digerido, como processo para redução de umidade e ovos de helmintos. Para um período de 28 dias disposto em leito de secagem, com ou sem revolvimento do lodo, obteve-se reduções de 81,61 a 97,48% na concentração de ovos viáveis que correspondem a valores finais de 0,34 a 9,33 ovos viáveis/gMS. Os teores finais de umidade variaram entre 55,82 e 77,46%. No experimento da cobertura com estufa plástica, o autor cita que as concentrações finais de ovos viáveis foram de 5,12 e 27,07 ovos por grama de matéria seca, com teores de umidade de 18,83% e 60,20%, respectivamente.

Na cidade de Recife (PE), Silva (2007) realizou experimentos com lodo gerado em reator UASB coletados em leitos de secagem, após 15 dias de secagem (umidade de

68,7%). O lodo foi disposto em caixas de madeira, em camadas de 10 cm, sendo submetidos a três tratamentos: cobertura com filme plástico transparente, cobertura com filme plástico preto e testemunha (descoberto). O tratamento com filme plástico transparente apresentou o melhor resultado, 0,22 ovo viável por grama de ST ao final de 35 dias, um valor ligeiramente abaixo do preconizado para uso agrícola do lodo Classe A.

Na cidade de Bursa, na Turquia, Salihoglu *et al.* (2007) estudaram um sistema de secagem de lodo que constituía-se de uma estrutura de piso em concreto e cobertura em policarbonato transparente, associado à utilização de 15% de cal (em base seca de lodo) para redução de coliformes fecais e incremento do teor de sólidos totais do lodo. Abaixo do piso havia uma camada constituída de pedras que se mantinham aquecidas pelo calor absorvido pela estrutura da cobertura, e ainda, ventiladores para renovação do ar saturado pela umidade interna. Ao utilizar camadas de 25 cm de lodo com 80% de umidade inicial, revolvido duas vezes por dia, os autores obtiveram ao final de 55 dias de monitoramento um teor de umidade de até 15% e densidades menores que 10^3 NMP/gST para coliformes fecais, no período do verão.

A realização de pesquisas de higienização de lodos com estufas plásticas pode dar indicações de como esse processo, ou mesmo técnicas já conhecidas, pode levar à higienização completa ou parcial de lodo de esgoto, particularmente nas diferentes condições climáticas brasileira.

Bonnet *et al.* (1998) *apud* Argel (2010) indicaram que o uso de estufa agrícola é um meio útil de aproveitamento da radiação solar, pois atua no aquecimento do ar interno, promovendo um efeito estufa que auxilia na regularização da temperatura do lodo e, afirmam que as concentrações de bactérias são reduzidas significativamente pela radiação solar e desidratação do lodo.

A seguir são apresentados alguns estudos para higienização de lodo de esgoto em que foram utilizadas estufas plásticas como cobertura.

Andreoli *et al.* (2000) comparou diversos tratamentos do lodo em leitos de secagem e relatou que os tratamentos com estufa (cobertura de filme plástico transparente 100 μ

UVB montada sobre o leito) apresentaram maior teor de sólidos que os demais, resultado da elevação da temperatura e evaporação. Ao final dos 25 dias de experimento o lodo atingiu teores de sólidos de aproximadamente 81% no tratamento em leito de secagem com estufa e sem aquecimento, contra 63% no tratamento convencional (sem estufa).

No estudo conduzido por Comparini (2001), o lodo, gerado pelo processo de lodos ativados, foi disposto em leiras montadas no interior de uma estufa agrícola com cobertura e laterais fechadas com lona plástica translúcida, com 150 micras de espessura, de forma a evitar o contato com águas de chuva. Inicialmente o lodo continha elevada umidade, cerca de 80%; à medida que o material secava, as leiras eram formadas com altura máxima de aproximadamente 0,50 m e eram revolvidas com pá uma vez por semana. O autor apresenta como um de seus principais resultados: A secagem em estufa agrícola, aliada a fatores como a exposição à luz solar, mostrou-se adequada à higienização do biossólido, tendo em vista a redução no conteúdo das bactérias *E. coli* para valores abaixo de 10^3 NMP/gMS, em umidade da ordem de 10%, a inativação das bactérias salmonelas em umidade da ordem de 25%, e a redução na concentração de ovos viáveis de helmintos para valores próximos de zero, em teores de umidade da ordem de 10% e cerca de 70 dias de secagem. Os resultados obtidos permitiriam a inclusão do biossólido na Classe A, possibilitando o uso na agricultura sem maiores restrições sob o ponto de vista microbiológico.

Em pesquisa realizada por Lima (2010) na cidade de Vila Velha (ES), foram realizados tratamentos do lodo em estufa agrícola, testemunha e caleação, todos com e sem revolvimento do lodo (gerado pelo processo de lodos ativados). O estudo tomou por base a metodologia utilizada por Comparini (2001) e apresentou os seguintes resultados para o lodo digerido sem cal higienizado em estufa: ausência de *Salmonella* sp. quando a umidade encontrava-se em torno de 27%, independente do tipo de tratamento; para o parâmetro coliformes termotolerantes o padrão classe A foi atingido no 14º dia de monitoramento (umidade em torno de 64%), na leira com camada de 10 cm de lodo e revolvimento de 3 vezes por semana; para o parâmetro ovos viáveis de helmintos, o padrão classe A foi atingido aos 14 dias com umidade igual a 80,44% na

leira com 20 cm de lodo e revolvimento 3 vezes por semana.

Na cidade de Viçosa (MG), Argel (2010) realizou experimentos com três lotes de lodo gerados em reator UASB e coletados em leitos de secagem (com umidade inicial em torno de 70%), utilizando os tratamentos com estufa agrícola (solarização) e caleação. Os resultados encontrados no experimento com estufa agrícola foram: apenas um dos lotes alcançou, aos 35 dias, padrão de lodo classe A para o parâmetro ovos viáveis de helmintos; não foi detectada a presença de *salmonella spp.* desde a primeira análise realizada, ou seja, em lodo ainda não solarizado; para coliformes totais, o menor valor observado em um dos lotes, aos 35 dias após o início do tratamento, foi de $1,53 \times 10^6$ NMP/g ST, sendo este um valor insuficiente para alcançar o padrão de lodo Classe A.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Serão abordados a seguir os assuntos: descrição sucinta do processo de tratamento dos esgotos na Estação de Tratamento de Esgotos de Castelo, descrição dos experimentos instalados, dos monitoramentos realizados e das metodologias empregadas nas análises laboratoriais.

4.1 PLANO EXPERIMENTAL

A estrutura física para a realização dos experimentos constituiu-se de quatro leitos de secagem preenchidos com diferentes taxas de ST aplicadas, sendo que, dois leitos foram cobertos com módulos de estufa agrícola.

Foram previstos períodos de 28 dias para cada repetição do experimento, com as seguintes datas de início e fim das amostragens:

- Primeira repetição: início em 24/02/2012 e término em 23/03/2012;
- Segunda repetição: início em 27/03/2012 e término em 24/04/2012;
- Terceira repetição: início em 27/04/2012 e término em 25/05/2012.

Em todas as amostras coletadas foram monitorados os parâmetros ST e SV a cada 7 dias e, os parâmetros *Salmonella sp.*, ovos viáveis de helmintos e coliformes termotolerantes a cada 14 dias. Esses parâmetros microbiológicos foram avaliados para enquadramento do lodo no padrão Classe A da Resolução n° 375/2006 do Conama.

Durante a realização do experimento foram monitoradas *in loco*, diariamente, as temperaturas máximas e mínimas dos leitos de secagem e do ambiente externo, bem como, o índice de precipitação pluviométrica.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Castelo localiza-se ao sul do estado do Espírito Santo e a sede do município possui as coordenadas geográficas 20°35'51" de Latitude Sul e 41°12'08" de

Longitude Oeste, e a altitude é de 159 m (IBGE, 2012). De acordo com a Prefeitura Municipal de Castelo (2012), a temperatura média anual da cidade encontra-se em torno de 23 °C.

A população segundo IBGE (2010) é de 33.716 habitantes, sendo que deste total, 21.180 habitantes (62,82%) são moradores de área urbana e 12.535 habitantes (37,18%) são moradores de área rural. O Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) de Castelo atende somente a população da área urbana do município.

Fatores climáticos favoráveis, disponibilidade de espaço físico na estação de tratamento de esgoto e tipo de lodo gerado (anaeróbio) propiciaram o desenvolvimento deste estudo no município de Castelo.

4.3 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ESGOTO NA ETE CASTELO

A ETE Castelo é constituída por um conjunto reator UASB + biofiltro aerado submerso (UASB + BF) para tratamento dos esgotos urbanos, predominantemente domésticos.

A ETE é operada pela CESAN e atende a uma população urbana de aproximadamente 8 mil habitantes, ou seja, cerca de 36% da população urbana do município. Algumas áreas rurais possuem sistemas independentes do tipo fossa-filtro que são mantidos e operados pela Prefeitura de Castelo com apoio da própria comunidade.

A ETE Castelo possui capacidade para atender a uma vazão de até 22 L.s⁻¹ e é composta das seguintes unidades de tratamento de esgoto: dois reatores UASB, um biofiltro aerado, sistemas de controle de odores composto de biofiltro e queimadores de gases, 10 leitos de secagem e laboratório.

A Figura 5 mostra a vista dos reatores UASB da ETE Castelo.

Figura 5 - Vista dos reatores UASB – ETE Castelo



As características operacionais dos reatores UASB e do Biofiltro são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Características operacionais dos reatores UASB e do Biofiltro da ETE Castelo

Características operacionais	UASB	Biofiltro
Altura útil (m)	5,00	3,30
Raio (m)	4,50	3,28
Área útil (m ²)	63,61	33,80
Volume útil (m ³)	318,09	111,53
Vazão (m ³ .h ⁻¹)	36,00	72,00
$\theta_h^{(1)}$ (h)	8,84	1,55
$C_v^{(2)}$ (kgDQO.m ⁻³ .d ⁻¹)	22,98	44,93
Velocidade ascensional (m.h ⁻¹)	0,57	2,13

Nota: (1) – Tempo de detenção hidráulica; (2) – Carga orgânica volumétrica.

Os esgotos sanitários coletados passam por medidor tipo Calha Parshal ao chegar a ETE e são encaminhados para uma etapa de pré tratamento, que inclui gradeamento e caixa desarenadora, para remoção de sólidos grosseiros e areia. Em seguida, o esgoto

livre de partículas sólidas grosseiras flui pelo vertedor passando pelas caixas de gordura para a retenção de óleos e graxas, e segue por gravidade aos reatores UASB, local onde ocorre a digestão anaeróbia da matéria orgânica. Os gases gerados nessa etapa do tratamento são queimados por meio de dois queimadores de gases, fazendo o controle de emissão dos mesmos. O efluente tratado passa ainda por uma etapa de pós tratamento no biofiltro aerado submerso, onde são removidos sólidos suspensos, compostos orgânicos e nitrogênio na forma solúvel (PALMA JÚNIOR; FÁBRIS, 2011).

O lodo gerado nesse processo de tratamento é desaguado nos leitos de secagem e em seguida encaminhado a um aterro sanitário. As quantidades e custos mensais referentes ao período de janeiro/2011 a abril/2012 de lodo enviado ao aterro sanitário são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Quantidade de lodo enviado a aterro sanitário periodicamente e respectivos custos

Data	Volume de lodo (m³)	Teor de ST¹ (%)	Peso (t)	Valor (R\$)
14/01/2011	10	70	10,42	2.347,00
15/02/2011	5	70	3,86	1.535,29
10/05/2011	5	70	2,52	1.069,06
13/07/2011	5	70	3,16	1.455,81
21/10/2011	6	70	4,44	1.604,37
05/04/2012	8	70	7,34	1.910,70
12/04/2012	5	70	4,20	1.577,06
Total	44	-	35,94	11.499,29

¹Nota: valores aproximados.

As características médias dos esgotos brutos afluentes à ETE Castelo e dos efluentes finais são apresentados no Apêndice A.

4.4 ADAPTAÇÃO DA ETE CASTELO PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

4.4.1 DIVISÃO DOS LEITOS DE SECAGEM

O presente estudo foi desenvolvido em escala real e tornou-se necessário a divisão de quatro leitos de secagem, devido a produção mensal de lodo para descarte ser menor do que a quantidade necessária ao experimento.

Considerando que os dez leitos de secagem da ETE possuem dimensões iguais a 10mx8m cada e as alturas de lodo desejadas para a pesquisa foram de 25 cm em dois leitos e 35 cm nos outros dois leitos, que correspondem a taxas de 10,2 kgSST.m⁻² e 14,3 kgSST.m⁻² respectivamente, o volume de lodo produzido (aproximadamente 60 m³ - teor de 3,5% de ST) seria incapaz de ocupar o volume de 96 m³ dos quatro leitos de secagem inteiros.

A Figura 6 apresenta os quatro leitos após a divisão, com dimensões de (5mx8m) cada.

Figura 6 - Vista parcial dos quatro leitos de secagem após divisão



4.4.2 MEDIÇÃO DA VAZÃO DE DESCARGA DE LODO

Considerando que a ETE Castelo não possui medidor de vazão de descarga de lodo, e devido a importância desse dado para a obtenção do volume de lodo descartado em cada leito de secagem, foi realizado um procedimento de medição de vazão, conforme descrito a seguir:

- Após a abertura dos registros dos reatores UASB, o lodo é encaminhado aos leitos de secagem, aonde chega primeiramente a um ponto de distribuição (Figura 7) de volume igual a $1,45 \text{ m}^3$;
- Foi considerado que a vazão para enchimento dos leitos seria constante e, de posse dos dados de volume do leito e vazão (calculada no ponto de distribuição), foi determinado o tempo necessário para encher o volume correspondente às taxas de $10,2 \text{ kgSST.m}^{-2}$ e $14,3 \text{ kgSST.m}^{-2}$ nos leitos.
- O experimento foi realizado em triplicata em todas as três descargas de lodo realizadas neste estudo.

A Figura 7 mostra o ponto de distribuição de lodo em dois momentos no experimento de medição de vazão.

Figura 7 - Ponto de distribuição no momento da medição de vazão



4.4.3 INSTALAÇÃO DOS MÓDULOS DE ESTUFA AGRÍCOLA

Para atender ao objetivo do estudo tornou-se necessário a construção de dois módulos de estufa agrícola sobre dois dos quatro leitos de secagem utilizados na pesquisa.

Os módulos possuem cobertura e laterais fechadas com lona plástica translúcida, com 150 micrômetros de espessura, de forma a evitar a entrada de água de chuva e possibilitar a penetração da radiação solar. Os módulos de estufa foram construídos com altura máxima central de 2,70 m acima da mureta dos leitos, com pilares de madeira e arcos de sustentação metálicos. Foram instalados sobre os leitos de secagem das extremidades direita e esquerda (Figura 8), ficando os dois leitos centrais descobertos. Foram adaptadas duas calhas para impedir a entrada de águas pluviais que escoam da estufa nos leitos vizinhos.

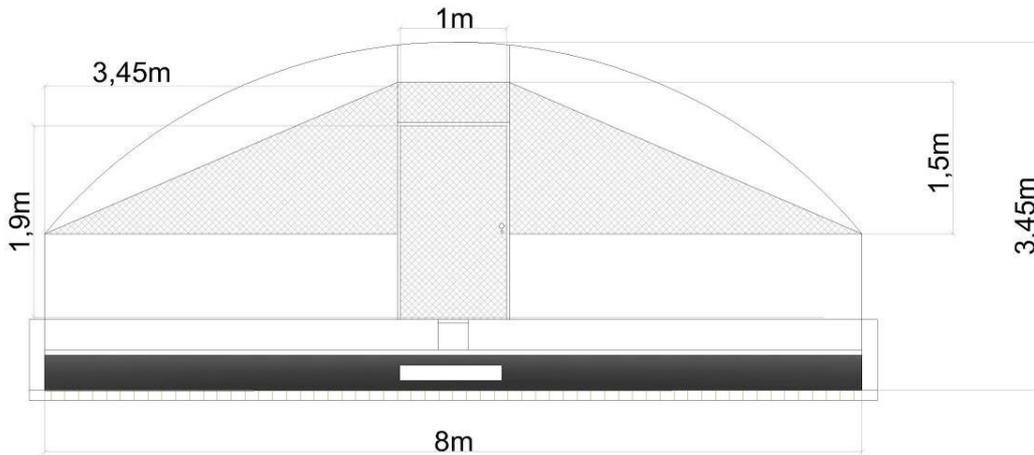
Figura 8 - Vista panorâmica dos quatro leitos de secagem e dos módulos de estufa instalados nos leitos das extremidades direita e esquerda



A estrutura das estufas foi construída com uma abertura frontal superior para permitir a ventilação interna e conseqüentemente a remoção da umidade dentro da estufa, que se torna elevada com a evaporação da água livre contida no lodo. Na primeira repetição essa abertura frontal foi mantida (área hachurada da Figura 9), entretanto, nas repetições 2 e 3 foi definido por fechar totalmente a estufa, permitindo a ventilação interna, quando necessária, através das cortinas laterais reguláveis.

Os detalhes e dimensões dos módulos de estufa construídos são apresentados na Figura 9.

Figura 9 - Detalhes do módulo de estufa construído sobre os leitos de secagem



Nota. A área hachurada mostra a abertura frontal para ventilação interna durante a Repetição 1.

No Apêndice B é apresentada a planta baixa dos leitos de secagem da ETE Castelo.

4.5 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DO PERÍODO DO EXPERIMENTO

Considerando que as condições meteorológicas da região exercem influência direta sobre os microorganismos e sobre o desaguamento do lodo, e que até então as referências de pesquisas similares a esta provêm de outras regiões do país, alguns dados meteorológicos foram observados em campo.

Foram monitoradas diariamente, com auxílio de quatro termo-higrômetros instalados in loco:

- temperatura e umidade interna da estufa 1;
- temperatura e umidade interna da estufa 2;
- temperatura e umidade dos leitos descobertos;
- temperatura e umidade relativa do ar à sombra.

Os termo-higrômetros digitais utilizados continham a seguinte especificação: faixa de medição de temperatura de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, com precisão de $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$; faixa de medição de umidade relativa do ar de 15 a 95%, com precisão de $\pm 5\%$.

Com o auxílio de um pluviômetro analítico, escala 0 a 150 mm, foi possível monitorar a precipitação durante todo o período do experimento.

A Figura 10 mostra o pluviômetro instalado nas proximidades dos leitos de secagem e, os termo-higrômetros instalados nas estufas, com o sensor de temperatura a 70 cm da camada suporte do leito.

Figura 10 - a) Pluviômetro utilizado; b) Termo-higrômetro instalado na estufa



a)



b)

4.6 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DE HIGIENIZAÇÃO DO LODO

4.6.1 CÁLCULO DA TAXA TEÓRICA DE SÓLIDOS TOTAIS APLICADA

O lodo estabilizado proveniente do reator UASB foi descarregado em quatro leitos de secagem, e cada um foi exposto aos seguintes tratamentos:

LC1: Leito de secagem coberto por módulo de estufa agrícola e com taxa de sólidos totais aplicada igual a $10,2 \text{ kgSST.m}^{-2}$;

LD1: Leito de secagem descoberto e com taxa de sólidos totais aplicada igual a $14,3 \text{ kgSST.m}^{-2}$;

LD2: Leito de secagem descoberto e com taxa de sólidos totais aplicada igual a $10,2 \text{ kgSST.m}^{-2}$;

LC2: Leito de secagem coberto por módulo de estufa agrícola e com taxa de sólidos totais aplicada igual a $14,3 \text{ kgSST.m}^{-2}$.

Considerando a área de 40m^2 de cada leito de secagem e um teor de sólidos totais igual a 4%, foram calculadas as taxas teóricas de sólidos totais de acordo com as Equações 2, 3 e 4:

$$V = S \cdot h \quad (2)$$

$$M_{ST} = C_{ST} \cdot V \cdot d \cdot 10^{-2} \quad (3)$$

$$T_{ST} = \frac{M_{ST}}{S} \quad (4)$$

Onde,

V: volume de lodo (L)

S: área do leito de secagem (m^2)

- h: altura de lodo no leito de secagem (m)
 M_{ST} : massa de sólidos totais (kg SST)
 C_{ST} : teor de sólidos totais (%)
d: densidade do lodo
 T_{ST} : taxa de sólidos totais aplicada (kgSST.m^{-2})

Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 9:

Tabela 9 - Cálculo da taxa teórica de ST aplicada nos leitos de secagem

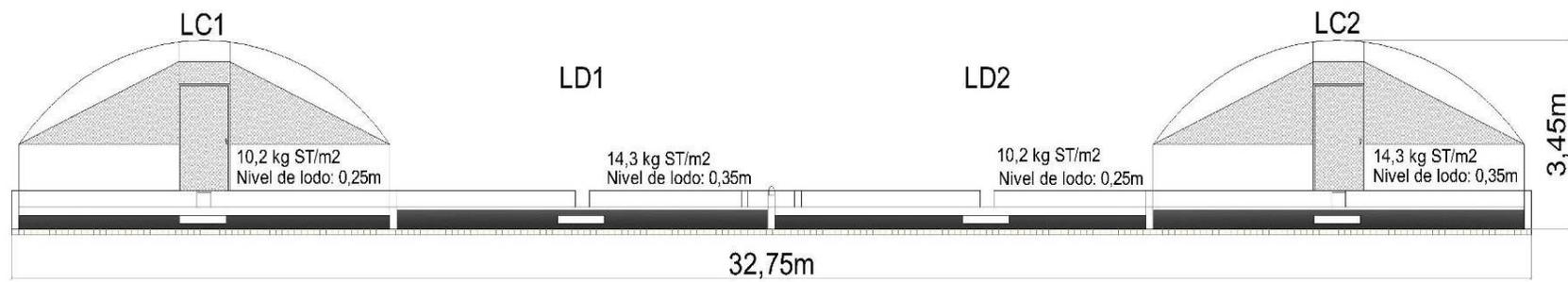
Leito de secagem	Teor de sólidos (%) (1)	Altura inicial (m) (2)	Volume (L) (3)=(2)x(S)	Densidade (4)	Massa ST (kgSST) (5)=(1)x10 ⁻² x(3)x(4)	Taxa de ST (kgSST.m^{-2}) (6)=(5)/(S)
LC1	4	0,25	10.000	1,02	408,0	10,2
LD1	4	0,35	14.000	1,02	571,2	14,3
LD2	4	0,25	10.000	1,02	408,0	10,2
LC2	4	0,35	14.000	1,02	571,2	14,3

A altura inicial de lodo nos leitos foi estipulada para fins de cálculo do volume teórico de lodo no leito. De posse dos dados do volume teórico e da vazão de descarga de lodo, foi possível determinar o tempo necessário para enchimento dos leitos até o volume teórico desejado.

As taxas de sólidos totais que foram aplicadas nos leitos de secagem obedecem aos critérios da ABNT (2011), que recomenda taxas de aplicação de até $15,0 \text{ kg SST.m}^{-2}$. Para a variação da carga de sólidos aplicada aos leitos, foi modificado apenas o valor da altura inicial de lodo, uma vez que esta variação representa, em uma mesma área superficial, o aumento/redução da taxa de sólidos aplicada.

A Figura 11 ilustra os leitos de secagem e os tratamentos utilizados no experimento.

Figura 11 - Desenho esquemático dos quatro leitos de secagem e respectivos tratamentos utilizados



4.6.2 PLANO DE AMOSTRAGEM

As amostras foram coletadas no período da manhã, segundo o calendário pré-estabelecido, iniciando em 24/02/12 e encerrando em 25/05/12.

O procedimento de amostragem foi realizado conforme descrito no item 4.2.5 da NBR 10.007 que estabelece os procedimentos para “Amostragem em leitos de secagem, lagoas secas e solos contaminados” (ABNT, 2004b, p. 6). A composição amostral foi obtida dividindo inicialmente o leito de secagem em uma rede quadriculada imaginária. De cada quadrícula foi retirada, com auxílio de uma pá de cabo longo (Figura 12a), uma amostra simples representativa da área. Essas amostras simples foram, então, homogeneizadas e quarteadas de forma a obter-se uma amostra composta representativa, com cerca de 2 kg (Figura 12b).

Figura 12 - a) Pá utilizada na coleta; b) Amostra composta



a)



b)

Nas datas de descarga do lodo, ou seja, no dia de início de cada repetição do experimento, as amostras em estado líquido, foram coletadas com coletores próprios para amostras nesse estado físico.

A Figura 13 mostra o coletor utilizado para amostragem de lodo líquido (a) e o momento da coleta (b).

Figura 13 - a) coletor de amostra em estado líquido; b) momento da coleta



a)



b)

Coletores, baldes, pás e frascos de coleta específicos auxiliaram na coleta. Antes e após a coleta os recipientes/instrumentos eram devidamente lavados em água corrente e higienizados com álcool a 70% v/v.

A amostra composta foi dividida para envio aos laboratórios responsáveis pela realização das análises (Quadro 1, item 4.6.3.3), com preservação por refrigeração a 4°C.

A programação das amostragens previa e seguiu um intervalo de tempo máximo de 24 horas entre a coleta e a entrada das amostras nos laboratórios.

4.6.3 FREQUÊNCIA, QUANTIDADE E TIPOS DE ANÁLISES

4.6.3.1 Análises microbiológicas

No presente estudo foram avaliados os seguintes parâmetros microbiológicos:

- as concentrações de bactérias coliformes termotolerantes e os resultados expressos em Número Mais Provável por grama de ST (NMP/g ST);
- as bactérias *Salmonella sp.* em termos de presença ou ausência, não se efetuando a quantificação;
- as concentrações de ovos viáveis de helmintos, sendo identificadas e quantificadas as espécies encontradas.

Apesar da exigência por parte da Resolução nº 375/2006 do Conama, não foi possível a avaliação das concentrações de vírus entéricos em virtude das dificuldades encontradas em termos de custo e disponibilidade de laboratório para a realização.

Para os indicadores microbiológicos foram coletadas amostras a cada 14 dias, durante o período que compreendeu a realização das três repetições. As análises de coliformes termotolerantes, *Salmonella sp.* e ovos de helmintos foram realizadas em triplicata.

4.6.3.2 Características físicas e químicas

Os parâmetros umidade, sólidos totais e voláteis foram avaliados semanalmente, compreendendo também todas as amostras coletadas para análises microbiológicas. Essas análises também foram realizadas em triplicata.

4.6.3.3 Metodologias analíticas utilizadas e laboratórios responsáveis

No Quadro 1 são apresentadas as metodologias analíticas utilizadas na determinação dos parâmetros monitorados, bem como a frequência e os laboratórios responsáveis pelas análises.

Quadro 1 - Parâmetros monitorados na pesquisa, frequência, métodos e laboratórios responsáveis

Parâmetro	Referência da técnica analítica ⁽¹⁾	Laboratório responsável	Frequência das análises
Sólidos totais (umidade) e sólidos voláteis	APHA, 2005	CESAN ⁽²⁾	7 em 7 dias
Coliformes Termotolerantes	CETESB L5.550, 1992	CETAN ⁽³⁾	14 em 14 dias
<i>Salmonella</i> sp.	US EPA, 2003		
Ovos viáveis de helmintos	US EPA, 2003		

Nota: (1) – Todas as análises seguiram os critérios estabelecidos pela Resolução n° 375/2006 do Conama – ANEXO II (Brasil, 2006); (2) – Laboratório Central da Companhia Espírito Santense de Saneamento; (3) – Centro Tecnológico de Análises.

4.7 ANÁLISE DOS DADOS

No tratamento dos dados, foram realizados testes de análise de variância para determinar as diferenças estatísticas entre os resultados encontrados de temperatura e umidade relativa do ar, em relação aos leitos cobertos e descobertos. Para verificar a existência de normalidade dos dados foi realizado o teste de Kolmogorov-Smirnov, para determinar se existe ao menos uma mediana diferente entre os leitos estudados utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis e, para verificar onde está a diferença foi feito o teste Post-Hoc de Fisher. Foi utilizado o nível de significância menor que 5% (p-valor <0,05) para rejeitar a igualdade das médias, ou seja, para descartar a hipótese de igualdade entre as variáveis temperatura e umidade relativa do ar na comparação dos resultados entre leitos cobertos e descobertos.

Para verificar as possíveis diferenças entre as variáveis taxa de ST aplicada e umidade da amostra de lodo, em relação aos leitos cobertos e descobertos, foi utilizado o teste

de Mann-Whitney, ao nível de significância de 5%, descartando-se apenas as umidades das amostras relativas ao dia zero, pois foram consideradas iguais.

Foi proposto um modelo de regressão linear múltipla para relacionar a variável dependente umidade com as variáveis independentes taxa de ST aplicada (alta e baixa), tipos de leito (cobertos e descobertos) e datas das coletas. Os testes dos pressupostos da regressão foram: ausência de multicolinearidade (VIF), normalidade dos resíduos (Kolmogorov-Smirnov), ausência de autocorrelação serial (Durbin-Watson) e ausência de heterocedasticidade (Pesarán-Pesarán).

Recursos computacionais utilizados:

- Word 2003
- Excel 2003
- Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) versão 18.0

Técnicas estatísticas utilizadas:

- Estatística Descritiva
- Regressão linear múltipla
- Testes não paramétricos para amostras independentes: Kolmogorov-Smirnov; Kruskal-Wallis; Fisher (Post-Hoc); Mann-Whitney.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados a seguir utilizam-se da seguinte legenda:

LC1: Leito coberto 1 com taxas de sólidos totais aplicadas nas repetições 1, 2 e 3 de **6,4, 7,6 e 7,6** kgSST.m⁻², respectivamente.

LD1: Leito descoberto 1 com taxas de sólidos totais aplicadas nas repetições 1, 2 e 3 de **10,3, 12,1 e 15,3** kgSST.m⁻², respectivamente.

LD2: Leito descoberto 2 com taxas de sólidos totais aplicadas nas repetições 1, 2 e 3 de **9,7, 9,9 e 9,9** kgSST.m⁻², respectivamente.

LC2: Leito coberto 2 com taxas de sólidos totais aplicadas nas repetições 1, 2 e 3 de **16,8, 17,8 e 15,3** kgSST.m⁻², respectivamente.

5.1 TAXA REAL DE SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS APLICADA NOS LEITOS DE SECAGEM

De posse dos resultados de sólidos totais de cada descarga de lodo realizada foi possível calcular a massa real de sólidos totais aplicada nos leitos de secagem, de acordo com as equações 4 e 5:

$$\text{Massa teórica de ST} \quad M_{ST}^t = V_t \cdot C_t \cdot d_t \quad (4)$$

$$\text{Massa real de ST} \quad M_{ST}^r = V_r \cdot C_r \cdot d_r \quad (5)$$

Sabendo-se que das variáveis componentes das equações 4 e 5, houve alteração apenas no teor de ST real (C_r), foram feitas as seguintes suposições:

1. $V_t = V_r$ Volume teórico (V_t) = Volume real (V_r)
2. $C_t \neq C_r$ Teor de ST teórico (C_t) \neq Teor de ST real (C_r)
3. $d_t = d_r$ densidade teórica (d_t) = densidade real (d_r)

A partir das hipóteses foram calculadas as taxas reais de ST aplicadas nos leitos de secagem (T_{ST}^r) bem como a diferença entre a taxa teórica e a taxa real (ΔT_{ST}), através das equações 6, 7, 8 e 9:

$$T_{ST} = \frac{M_{ST}}{S} \quad (6)$$

$$T_{ST}^r = \frac{M_{ST}^r}{S} \quad (7)$$

$$T_{ST}^t = \frac{M_{ST}^t}{S} \quad (8)$$

Ou seja, a diferença entre a taxa teórica e a taxa real de ST é:

$$\Delta T_{ST} = T_{ST}^t - T_{ST}^r$$

Os resultados dos cálculos são apresentados nas Tabelas 10, 11 e 12 para as repetições 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 10 - Cálculo da diferença entre as taxas real e teórica de sólidos totais aplicada nos leitos de secagem na Repetição 1

Leito	ST (%) (1)	Altura inicial (m) (2)	Volume (L) (3)=(2)x(S)	Densidade (4)	Massa ST (kgSST) (5)=(1)x10 ⁻² x(3)x(4)	T _{ST} ^t (kgSST.m ⁻²)	T _{ST} ^r (kgSST.m ⁻²) (6)=(5)/(S)	ΔT _{ST} (kgSST.m ⁻²)
LC1	2,5	0,25	10.000	1,02	255,0	10,2	6,4	+ 3,6
LD1	2,9	0,35	14.000	1,02	414,1	14,3	10,3	+ 3,7
LD2	3,8	0,25	10.000	1,02	387,6	10,2	9,7	+ 0,3
LC2	4,7	0,35	14.000	1,02	671,2	14,3	16,8	- 2,8

Tabela 11 - Cálculo da diferença entre as taxas real e teórica de sólidos totais aplicada nos leitos de secagem na Repetição 2

Leito	ST (%) (1)	Altura inicial (m) (2)	Volume (L) (3)=(2)x(S)	Densidade (4)	Massa ST (kgSST) (5)=(1)x10 ⁻² x(3)x(4)	T _{ST} ^r (kgSST.m ⁻²)	T _{ST} ^r (kgSST.m ⁻²) (6)=(5)/(S)	ΔT _{ST} (kgSST.m ⁻²)
LC1	3,0	0,25	10.000	1,02	306,0	10,2	7,6	+ 2,4
LD1	3,4	0,35	14.000	1,02	485,5	14,3	12,1	+ 1,9
LD2	3,9	0,25	10.000	1,02	397,8	10,2	9,9	+ 0,1
LC2	5,0	0,35	14.000	1,02	714,0	14,3	17,8	- 2,8

Tabela 12 - Cálculo da diferença entre as taxas real e teórica de sólidos totais aplicada nos leitos de secagem na Repetição 3

Leito	ST (%) (1)	Altura inicial (m) (2)	Volume (L) (3)=(2)x(S)	Densidade (4)	Massa ST (kgSST) (5)=(1)x10 ⁻² x(3)x(4)	T _{ST} ^r (kgSST.m ⁻²)	T _{ST} ^r (kgSST.m ⁻²) (6)=(5)/(S)	ΔT _{ST} (kgSST.m ⁻²)
LC1	3,0	0,25	10.000	1,02	306,0	10,2	7,6	+ 2,4
LD1	4,3	0,35	14.000	1,02	614,0	14,3	15,3	- 1,3
LD2	3,9	0,25	10.000	1,02	397,8	10,2	9,9	+ 0,1
LC2	4,3	0,35	14.000	1,02	614,0	14,3	15,3	- 1,3

A descarga nos leitos de secagem obedeceu a seguinte ordem: LC2, LD2, LD1 e LC1. É possível notar nas Tabelas 10, 11 e 12 que o lodo com maior teor de ST foi preenchendo os primeiros leitos, restando para os últimos um lodo menos concentrado em ST. Isso pode ser explicado pela estratificação das camadas de lodo que ocorre no reator UASB ao longo de sua altura.

No fundo do reator encontra-se o lodo mais denso com partículas granulares que sedimentam facilmente, camada denominada leito de lodo, em que as concentrações de sólidos estão na faixa de 4 a 10%. Próximo ao topo do compartimento de digestão encontra-se o lodo floculento, ou seja, que possui menor densidade (manta de lodo), com concentrações de sólidos na faixa de 1 a 3% (CRIBARI, 2004).

Os diferentes teores de ST do lodo de descarte influenciaram diretamente na taxa de ST aplicada nos leitos de secagem, sendo variável ainda devido ao diferenciado volume de lodo nos leitos.

5.2 MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DO AR

Os resultados obtidos no monitoramento diário das temperaturas no interior dos leitos cobertos (estufas), dos leitos descobertos e no ambiente (à sombra) encontram-se no Apêndice C.

Resumidamente, são apresentados na Tabela 13 as médias das temperaturas médias diárias, das máximas e das mínimas nos leitos cobertos, descobertos e no ambiente durante as 3 repetições do experimento.

Tabela 13 - Médias das temperaturas médias diárias, das máximas e das mínimas nos leitos cobertos, descobertos e no ambiente durante as 3 repetições do experimento

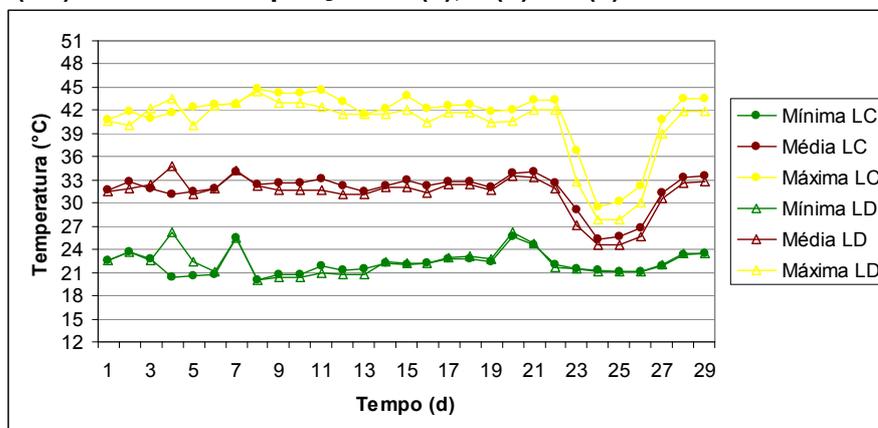
Repetição	Período	Temperatura (°C)								
		Média das médias			Média das Máximas			Média das Mínimas		
		T _{LC}	T _{LD}	T _A	T _{LC}	T _{LD}	T _A	T _{LC}	T _{LD}	T _A
1	24/02/12 a 23/03/12	31,7	31,2	27,9	41,3	40,1	34,2	22,2	22,4	21,6
2	27/03/12 a 24/04/12	32,8	29,2	25,2	43,9	37,5	30,3	21,7	20,8	20,1
3	27/04/12 a 25/05/12	27,5	25,5	21,5	36,0	33,0	25,3	19,0	18,0	17,6
Média		30,7	28,6	24,9	40,4	36,9	29,9	21,0	20,4	19,8

Nota: TLC: Temperatura nos Leitos Cobertos; TLD: Temperatura nos Leitos Descobertos; TA: Temperatura Ambiente

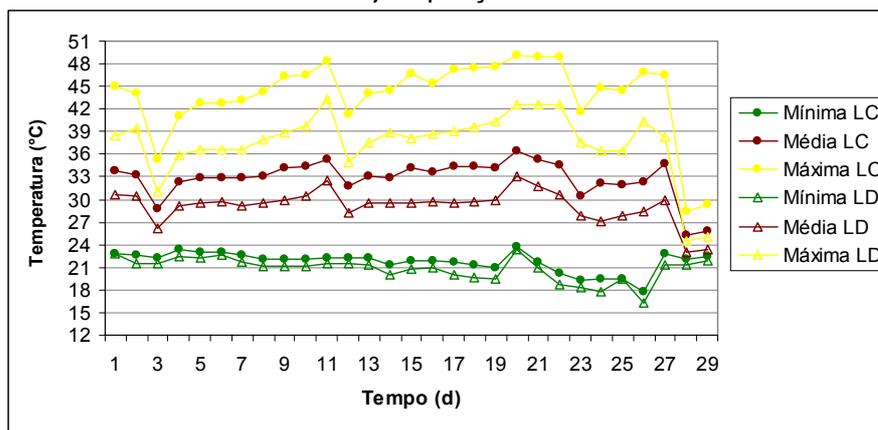
Observa-se na Tabela 13 que as temperaturas dentro dos leitos cobertos com módulos de estufa agrícola (LC) ficaram ligeiramente acima das temperaturas nos leitos descobertos (LD).

A Figura 14 mostra os resultados das temperaturas monitoradas nos leitos cobertos e descobertos durante as três repetições do experimento.

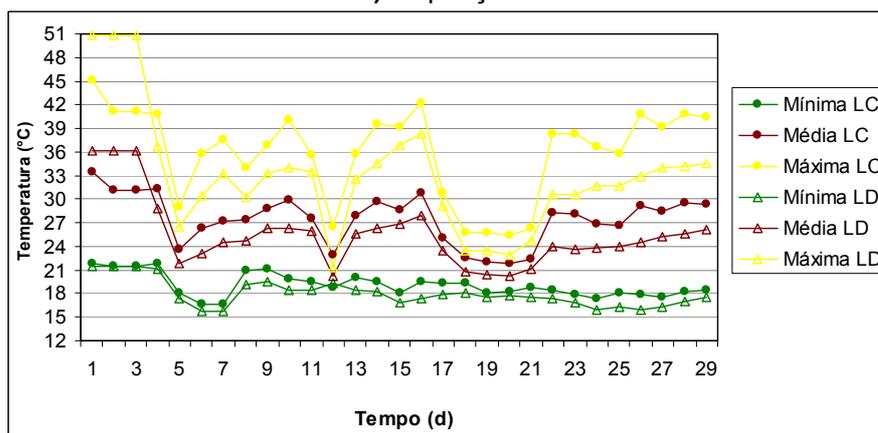
Figura 14 - Médias das temperaturas dos leitos cobertos (LC) e temperaturas dos leitos descobertos (LD) durante as Repetições 1 (a), 2 (b) e 3 (c)



a) Repetição 1



b) Repetição 2



c) Repetição 3

Na Figura 14 é possível observar detalhadamente que os valores das temperaturas nos leitos cobertos mantiveram-se próximos daqueles dos leitos descobertos em praticamente todos os dias durante as Repetições 1, 2 e 3, entretanto, pode-se verificar diferenças estatisticamente significantes entre os dois tipos de leitos, conforme apresenta a Tabela 14.

A maior amplitude observada nas temperaturas máximas entre leitos cobertos e descobertos foi de 8,6°C, fato que ocorreu durante a Repetição 2 (dia 15).

No Apêndice C pode-se observar que nos leitos cobertos por estufas a maior temperatura registrada foi de 49,6°C durante três dias consecutivos na Repetição 2, enquanto para os leitos descobertos a temperatura registrada foi de 42,6°C.

Foram realizadas análises estatísticas para identificação de possíveis diferenças na temperatura e umidade do ar entre os leitos estudados e, em quais leitos se encontravam. A Tabela 14 apresenta o resultado do teste de comparação múltipla de Fisher.

Tabela 14 - Comparação múltipla de Fisher de média de ordens para umidade e temperatura do ar nos leitos estudados

Variável	LC1-LC2	LC1-LD	LC2-LD
Umidade do ar	0,043	0,005	0,409
Temperatura do ar	0,723	0,000	0,000

Nota: Os valores numéricos apresentados são referentes aos p-valores.

De acordo com o resultado exibido na Tabela 14, observa-se que a umidade relativa do ar dentro do Leito Coberto 1 (LC1) é estatisticamente diferente, ao nível de significância de 5%, dos leitos descobertos (LD) e também do Leito Coberto 2 (LC2), porém, não houve diferença estatisticamente significativa entre os LD e o LC2, fato que pode estar relacionado a maior taxa de ST aplicada no LC2, sendo maior o índice de evaporação e, conseqüentemente, a umidade relativa do ar dentro da estufa.

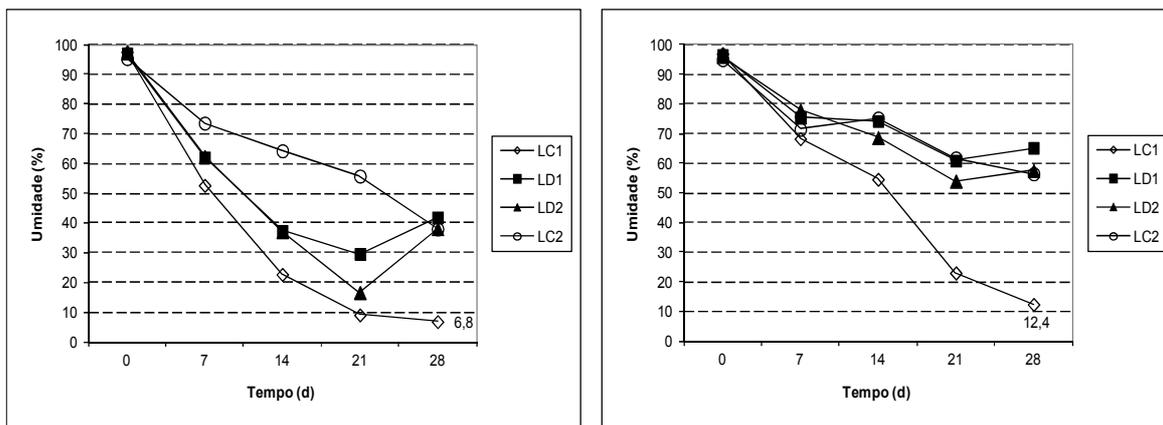
Em relação à temperatura do ar, não houve diferença estatisticamente significativa entre os leitos cobertos (LC1 e LC2), no entanto, pode-se verificar diferença entre as temperaturas para ambos os leitos cobertos em relação aos descobertos (LC1-LD e LC2-LD), fato já esperado devido a capacidade da estufa agrícola em aproveitar a

radiação solar promovendo um aquecimento do ar interno.

5.3 MONITORAMENTO DA UMIDADE DO LODO

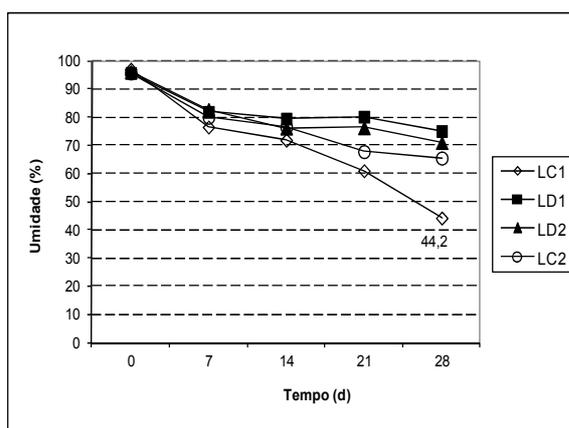
O monitoramento da umidade do lodo em processo de secagem foi realizado a cada 7 dias para os leitos cobertos e descobertos. A Figura 15 mostra os resultados obtidos nas três repetições do experimento.

Figura 15 - Monitoramento da umidade do lodo nos leitos cobertos (LC1 e LC2) e nos leitos descobertos (LD1 e LD2) durante as Repetições 1 (a), 2 (b) e 3 (c)



a) Repetição 1

b) Repetição 2



c) Repetição 3

É possível observar nos gráficos um comportamento semelhante entre os leitos em relação à perda de umidade da massa de lodo, com maior destaque para o LC1 em todas as três repetições do experimento.

O processo da secagem natural do lodo em leitos de secagem é dominado pelos fenômenos da percolação e evaporação. Na primeira semana após a descarga do lodo o fenômeno predominante é a percolação que proporciona o desague da água livre presente no lodo. Nas semanas seguintes o fenômeno da evaporação predomina e este está diretamente relacionado às condições climáticas como temperatura, umidade relativa do ar e índice de precipitação pluviométrica.

Os menores valores de umidade do lodo foram alcançados na Repetição 1 e essa constatação pode estar associada aos seguintes fatores:

- Embora na repetição 2 a média das temperaturas médias diárias tenha sido ligeiramente maior que as outras repetições (Tabela 15), na repetição 1 as estufas continham uma abertura frontal na parte superior que permitira uma ventilação constante e conseqüente remoção da umidade do meio;
- Na repetição 1 a umidade média relativa do ambiente externo manteve-se menor que nas outras repetições (Tabela 15 e Apêndice D) devido ao índice pluviométrico médio que também foi menor (Apêndice E).

Tabela 15 - Comparação da média das temperaturas médias diárias e da umidade média do ar nos leitos cobertos e descobertos durante as repetições 1, 2 e 3

Local	LC1			LC2			LD1 e LD2			Ambiente externo ¹		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Média das temperaturas médias (°C)	32,0	32,7	27,5	31,5	32,9	27,6	31,2	29,2	25,5	27,9	25,2	21,5
Umidade média do ar (%)	62,0	76,6	87,9	70,6	80,8	88,5	69,3	87,0	89,0	72,6	86,7	90,8

Nota 1: medida realizada à sombra

A amostra de lodo que obteve o menor valor de umidade ao final do experimento foi do LC1 na Repetição 1 ($6,4 \text{ kgSST.m}^{-2}$), apresentando 6,8% de umidade, consistindo numa amostra de consistência física de pó fino. Amostras que chegam a essa consistência indicam um bom resultado quanto aos aspectos econômicos da ETE, pois acarreta em diminuição do custo de transporte do lodo à destinação final.

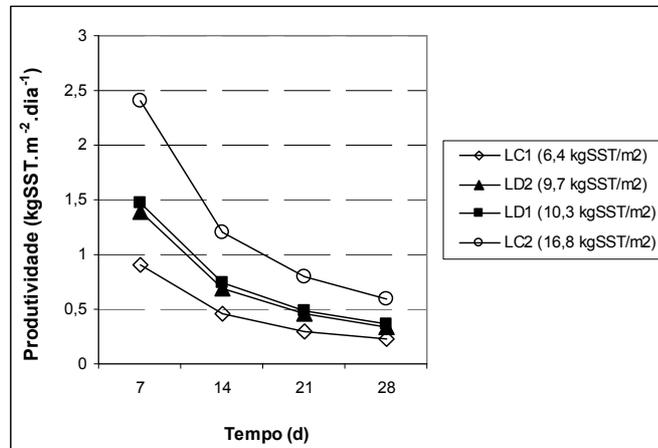
Os resultados obtidos para o desaguamento do lodo em leitos de secagem mostram-se condizentes com aqueles encontrados na literatura. Segundo Jordão e Pessoa (2005) em condições climáticas normais, o lodo poderá ser removido do leito de secagem convencional após um período de 12 a 20 dias, com a umidade em torno de 70 a 60%. O mesmo autor cita que em experiências realizadas na ETE da Penha – RJ, após 20 dias no leito de secagem convencional o lodo atingiu umidade média de 50% e, na ETE Cabanga - Recife, tempos de aproximadamente 15 dias foram suficientes para alcançar um teor de umidade de 60 a 70%. Andreoli *et al.* (2000) constatou que a secagem do lodo em estufa plástica sem injeção de calor pode produzir lodo com 80% de sólidos totais em 28 dias.

5.4 INFLUÊNCIA DA TAXA DE ST NO DESAGUAMENTO DO LODO

De posse dos resultados dos cálculos da taxa real de sólidos totais aplicadas (T_{ST}^r) nos leitos de secagem foi possível calcular a produtividade de cada leito. Os resultados da produtividade dos leitos de secagem são apresentados na Figura 16 para a Repetição 1, que foi a que obteve melhores resultados finais de incremento de sólidos totais do lodo.

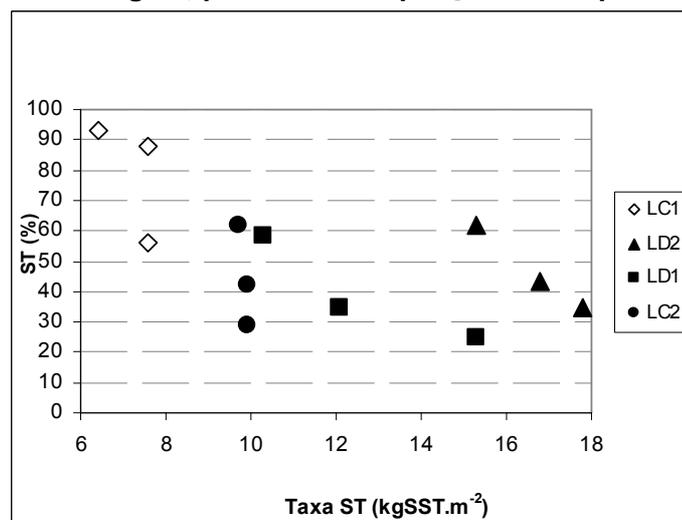
De acordo com o gráfico apresentado na Figura 16 é possível observar que, na teoria, o leito de secagem com maior produtividade é aquele que possui maior taxa de sólidos totais aplicada, neste caso, o LC2.

Figura 16 - Gráfico da produtividade dos leitos de secagem na Repetição 1



No entanto, o gráfico apresentado na Figura 17 relaciona a taxa de ST aplicada com o teor de ST das amostras de lodo ao final de 28 dias de experimento, para cada leito de secagem. Pode-se verificar que apesar do aumento da produtividade do leito de secagem estar diretamente relacionada com o aumento da taxa de sólidos totais aplicada (Figura 16), observa-se uma tendência inversa em relação ao incremento de sólidos totais, ou seja, quanto maior a taxa de sólidos totais aplicada menor o teor final de ST da amostra (Figura 17).

Figura 17 - Gráfico do teor de ST das amostras ao final dos 28 dias versus taxas de ST aplicadas nos leitos de secagem, para as três repetições do experimento



Foi realizada a análise estatística de Mann-Whitney para verificar se existe diferença de umidade das amostras de lodo nas seguintes situações:

- Avaliação da influência do tipo de leito (coberto e descoberto) na umidade final;
- Avaliação da influência da taxa de ST aplicada (menor e maior) na umidade final.

Foram excluídos do teste os resultados referentes às umidades das amostras no dia zero por considerar serem iguais.

Os resultados do teste de Mann-Whitney são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Teste de Mann-Whitney

Avaliação	Combinação	Leito	Média das T_{ST} (kgSST.m ⁻²)	N	Média dos rankings	Soma dos rankings	P-Valor
Tipo de leito	LC1_LD2	LC1	7,2	12	9,92	119,00	0,04
		LD2	9,8	12	15,08	181,00	
		Total		24			
Tipo de leito	LD1_LC2	LD1	12,6	12	12,83	154,00	0,42
		LC2	16,6	12	12,17	146,00	
		Total		24			
Tipo de leito e T_{ST}	LC1_LD1	LC1	7,2	12	9,42	113,00	0,02
		LD1	12,6	12	15,58	187,00	
		Total		24			
Tipo de leito e T_{ST}	LD2_LC2	LD2	9,8	12	12,00	144,00	0,38
		LC2	16,6	12	13,00	156,00	
		Total		24			
T_{ST}	LC1_LC2	LC1	7,2	12	9,13	109,50	0,01
		LC2	16,6	12	15,88	190,50	
		Total		24			
T_{ST}	LD2_LD1	LD2	9,8	12	11,92	143,00	0,36
		LD1	12,6	12	13,08	157,00	
		Total		24			

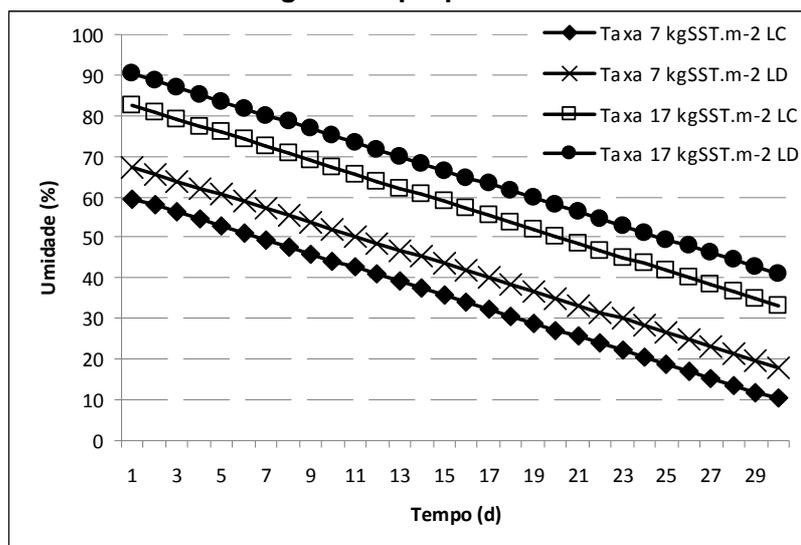
De acordo com o teste, podemos verificar que não houve diferença estatisticamente significativa entre os leitos: LD1 vs LC2, LD2 vs LC2 e LD2 vs LD1. Já os testes para

detectar diferenças entre os leitos LC1 vs LD2, indicam haver maior umidade presente no leito descoberto 2 quando comparado ao leito coberto 1. Na comparação feita entre LC1 vs LD1, existe amostra de lodo com maior umidade no leito descoberto 1 quando comparado com o leito coberto 1, também foi encontrada diferença significativamente maior na umidade do lodo do leito coberto 2 comparado com o leito coberto 1 no teste entre LC2 vs LC1.

Foi proposto ainda, um modelo de regressão linear múltipla, para relacionar o comportamento da umidade do lodo ao longo do tempo com a taxa de ST aplicada e com a influência da cobertura do leito. O modelo de regressão proposto é significativo estatisticamente ($P\text{-Valor} = 0,00$) e todos os pressupostos da regressão foram satisfeitos, como ausência de autocorrelação (1,97), normalidade dos resíduos (0,20), ausência de heterocedasticidade (0,64) e ausência de multicolinearidade (1,01, 1,01 e 1,00). O modelo proposto é capaz de explicar cerca de 61% a regressão ($R^2_{\text{ajustado}} = 61\%$).

A Figura 18 mostra o resultado do modelo proposto para taxas de ST aplicada de 7 kgSST.m⁻² e 17 kgSST.m⁻², ou seja, aproximadamente a menor e a maior taxa utilizada nesta pesquisa.

Figura 18 - Gráfico do modelo de regressão proposto



O modelo mostrou que para o mesmo tipo de leito, para cada incremento de 1 (uma) unidade na taxa de ST aplicada, a umidade do lodo no leito será, em média, acrescida em 2,3 unidades, para o mesmo período de exposição e desconsiderando-se as variáveis meteorológicas. Pode-se observar na Figura 18, que o leito coberto diminui o teor de umidade do lodo, em média, em 7,7 unidades em relação ao leito descoberto com mesma taxa de ST aplicada.

A Tabela 17 relaciona o tempo de exposição necessário do lodo no leito para se alcançar um teor de umidade final de aproximadamente 50%. Observa-se que para uma mesma taxa de ST aplicada, o leito coberto atinge o teor de umidade final do lodo em menor tempo, resultando em maior rotatividade para as descargas de lodo no leito.

Tabela 17 - Tempo de exposição, Taxa ST aplicada e teor de umidade final de 50%

Leito	Taxa (kgSST.m ⁻²)	Tempo aproximado (d)
LC	7	6
LD	7	10
LC	17	19
LD	17	24

Observa-se também, que com a utilização de menores taxas de ST aplicadas possibilita-se atingir uma umidade final desejada do lodo em menor tempo, propiciando ciclos mais curtos de desaguamento. Essa prática também se mostra interessante em períodos com condições climáticas mais amenas, ou seja, que apresentam menor temperatura ambiente e/ou maior umidade relativa do ar, em que o desaguamento torna-se mais demorado.

Um dos resultados obtidos por Cherubini *et al.* (2002) mostrou que ao utilizar taxas de 34,5 kgSST.m⁻², em leitos de secagem convencionais e em leitos cobertos, a camada superficial do perfil apresentou um teor de ST maior quando comparada à camada inferior, alcançando diferenças de até 14% aos 30 dias de secagem.

5.5 RESULTADOS DA RELAÇÃO SV/ST

São apresentados na Tabela 18 os resultados da relação entre sólidos voláteis e sólidos totais das amostras coletadas.

Tabela 18 - Relação entre sólidos voláteis (SV) e sólidos totais (ST) nas amostras de lodo analisadas

Data	Tempo (d)	SV/ST (%)			
		LC1	LD1	LD2	LC2
Repetição 1					
24/02/12	0	62,90	62,20	62,11	60,85
02/03/12	7	43,93	54,32	56,40	57,54
09/03/12	14	50,28	50,50	52,78	53,81
16/03/12	21	54,25	51,98	49,15	48,53
23/03/12	28	52,66	51,67	53,17	53,28
Repetição 2					
27/03/12	0	62,96	62,79	61,99	61,09
03/04/12	7	58,30	59,79	61,67	59,43
10/04/12	14	59,05	60,61	58,43	66,06
17/04/12	21	53,81	55,63	54,15	55,81
24/04/12	28	48,64	53,16	49,07	50,21
Repetição 3					
27/04/12	0	63,28	62,56	62,98	62,53
04/05/12	7	61,32	61,21	62,13	62,04
11/05/12	14	60,80	62,07	60,51	59,69
18/05/12	21	58,32	61,55	60,79	57,04
25/05/12	28	49,58	58,86	57,66	51,96

É possível evidenciar que as três repetições do experimento promoveram uma redução na concentração dos Sólidos Voláteis (SV) em relação aos Sólidos Totais (ST), de aproximadamente 62% no início dos experimentos para valores da ordem de 52% ao final. Esses resultados comprovam que há continuidade do processo de estabilização da fração orgânica do lodo tanto na exposição em leitos de secagem cobertos quanto nos descobertos. Resultados parecidos foram conseguidos por Comparini (2001) e Lima (2010) sendo que este último obteve valores de até 36,9% na relação SV/ST para o lodo tratado sem cal, submetido à secagem em estufa agrícola em forma de leiras com 10 cm de altura e revolvidas 3 vezes por semana.

As oscilações apresentadas nos resultados periódicos podem ser explicadas pela forma

de amostragem e homogeneização das amostras.

5.6 RESULTADOS DA CONTAGEM DE OVOS VIÁVEIS DE HELMINTOS

São apresentados na Tabela 19 os resultados referentes às análises de ovos viáveis de helmintos realizadas em intervalos regulares de 14 dias para as três repetições do experimento.

Tabela 19 - Resultados da contagem de ovos viáveis de helmintos nas amostras analisadas durante as Repetições 1, 2 e 3

Data	Tempo (d)	Ovos Viáveis de Helmintos (ovo / g de ST)				Umidade da amostra (%)			
		LC1	LD1	LD2	LC2	LC1	LD1	LD2	LC2
Repetição 1									
24/02/12	0	40	0,3	40	20	97,50	97,10	97,20	95,30
09/03/12	14	525	60	340	235	22,70	37,40	37,10	64,30
23/03/12	28	1,2	12	2,9	5,2	6,80	41,90	38,10	38,00
Repetição 2									
27/03/12	0	0,3	0,1	0	0	97,00	96,60	96,10	95,00
10/04/12	14	85	17	35	33	54,60	74,30	68,70	75,30
24/04/12	28	2,6	1,9	2	0,6	12,40	65,20	57,60	56,50
Repetição 3									
27/04/12	0	0,3	0,3	0,3	0,3	97,00	95,70	96,10	95,70
11/05/12	14	110	8,1	1,3	10	71,90	79,50	76,20	76,50
25/05/12	28	16	17	15	126	44,20	75,10	71,00	65,50

Observa-se na Tabela 19 que os resultados da contagem de ovos viáveis de helmintos apresentaram grande variabilidade entre as coletas nas três repetições.

Na repetição 3 houve predominância de temperaturas médias mais amenas e maior incidência de chuvas como pode ser notado nos Apêndices C e E, criando condições desfavoráveis à dessecação dos ovos, representando a repetição que apresentou ao final dos 28 dias a contagem com maior número de ovos viáveis por grama de ST.

Mesmo com reduções expressivas de até 99,8% (LC1 - repetição 1) na quantidade de ovos viáveis e baixas umidades das amostras, especialmente no LC1 que apresentou

6,8 % e 12,4% de umidade ao final das repetições 2 e 3 respectivamente, não foi possível atingir o padrão Classe A da Resolução nº 375/2006 do Conama que estabelece um limite de 0,25 ovos viáveis / g ST.

A redução da umidade é um fator relevante na redução da concentração de ovos de helmintos da massa de lodo, entretanto, outras condições como temperatura e radiação solar também são fundamentais para a completa inviabilização dos ovos.

Feachem *et al.* (1983) *apud* Comparini (2001) relata que os ovos de *Ancylostoma duodenale* podem permanecer viáveis por até 62 dias enquanto o lodo estiver em processo de secagem, até que a umidade seja reduzida a valores menores que 10%. Comparini (2001) cita que embora os ovos de *Ascaris* possam permanecer viáveis por muitos anos em condições favoráveis de umidade, podem ser destruídos pela secagem e exposição aos raios ultra-violeta. Segundo Tchobanoglous; Burton; Stensel (2003), temperaturas superiores a 50°C por um período maior que 60 minutos é referência para letalidade de *Ascaris lumbricoides*, *Taenia saginata* e inclusive *E. coli*.

Comparini (2001) nas três repetições de seu experimento com estufa agrícola não detectou ovos viáveis no bioossólido a partir dos seguintes tempos de secagem e valores de umidade: na 1ª, aos 71 dias, com 12,87%; na 2ª, aos 56 dias, com 28,58%; na 3ª, aos 70 dias, com 11,45%. Ou seja, foram necessários tempos maiores que 28 dias para adequação do bioossólido como Classe A.

No estudo com estufa agrícola conduzido por Lima (2010), no Ciclo 3, o padrão classe A foi alcançado aos 14 dias de monitoramento para a Leira com 20 cm de altura (umidade do lodo igual a 80,44%), sendo que, nos ciclos 1 e 2 o lodo digerido já apresentava quantidades de OVH abaixo de 0,25 ovo/gST.

Dos resultados das análises de ovos viáveis de helmintos só foram encontrados aqueles do grupo nematóides (vermes cilíndricos) conforme se apresenta na Tabela 20.

Tabela 20 - Espécies de helmintos encontrados durante as Repetições 1, 2 e 3 do experimento

Microorganismo	OVH (ovo / g de ST)			Total
	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	
<i>Ancylostoma</i> sp.	267,4	1,04	< 0,25	268,4
<i>Ascaris</i> sp.	20,6	1,52	15,2	37,3
<i>Strongyloides</i> sp.	993,1	175,33	288,2	1.456,6
Total	1.281,1	177,9	303,6	1.762,3

Pode-se verificar que a quantidade de ovos viáveis para helmintos do gênero *Strongyloides* foi majoritária, representando 83% dos resultados de todas as amostras analisadas, enquanto os gêneros *Ancylostoma* e *Ascaris* representaram 15% e 2%, respectivamente.

A estrogiloidíase é uma infecção de distribuição mundial heterogênea e que nos países tropicais prevalece em crianças. Como fatores epidemiológicos pode-se citar a contaminação do solo com fezes; temperatura ambiente entre 25 a 35°C; solo arenoso, úmido, rico em matéria orgânica e com ausência de luz direta (NEVES, 2005).

5.7 RESULTADOS PARA O PARÂMETRO *SALMONELLA* SP.

A variável microbiológica *Salmonella* sp. foi avaliada nos leitos cobertos (LC) e descobertos (LD) em termos de presença ou ausência, em intervalos regulares, consistindo no início, meio e fim de cada repetição do experimento. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Resultados para os parâmetros *Salmonella sp.* e umidade da amostra durante as 3 repetições do experimento

Data	Tempo (d)	<i>Salmonella sp.</i> (1)				Umidade da amostra (%)			
		LC1	LD1	LD2	LC2	LC1	LD1	LD2	LC2
Repetição 1									
24/02/12	0	A	A	A	A	97,50	97,10	97,20	95,30
09/03/12	14	P	P	P	P	22,70	37,40	37,10	64,30
23/03/12	28	P	P	P	A	6,80	41,90	38,10	38,00
Repetição 2									
27/03/12	0	A	A	A	A	97,00	96,60	96,10	95,00
10/04/12	14	A	A	P	P	54,60	74,30	68,70	75,30
24/04/12	28	P	P	A	P	12,40	65,20	57,60	56,50
Repetição 3									
27/04/12	0	A	A	A	A	97,00	95,70	96,10	95,70
11/05/12	14	A	A	A	A	71,90	79,50	76,20	76,50
25/05/12	28	A	A	A	A	44,20	75,10	71,00	65,50

Nota 1: Resultados expressos em termos de ausência (A) ou presença (P) em 10 g de amostra.

Pode-se notar dos resultados apresentados na Tabela 21 que a presença da bactéria *Salmonella sp.* foi detectada em várias amostras nas Repetições 1 e 2, tanto nos leitos cobertos (LC1 e LC2) quanto nos leitos descobertos (LD1 e LD2). Alguns fatores podem ter influenciado nesses resultados:

- a temperatura máxima da massa de lodo não foi suficiente para a letalidade da bactéria, ou seja, não alcançou 55°C por pelo menos 30 minutos de exposição segundo Tchobanoglous; Burton; Stensel (2003);
- ocorrência de recrescimentos devido as condições ambientais favoráveis durante o experimento, com temperaturas médias em torno de 32,0°C e máximas em torno de 45,0°C nos leitos de secagem;
- mesmo com a expressiva redução de umidade das amostras, especialmente no LC1, a insistente presença da bactéria parece configurar um caso de recontaminação por agentes externos. Resultado semelhante foi encontrado por Comparini (2001, p. 256) em amostra com 10,58% de umidade, que segundo o autor “não era de se esperar, já que esses organismos são, como outras bactérias, frágeis aos processos que incluem

radiação solar e desidratação”. Sabe-se que na área em que se situa a ETE há presença constante de pássaros e outros animais.

Um caso adverso ocorreu na Repetição 3, sendo possível observar na Tabela 21 que em nenhuma amostra foi detectada a presença de *Salmonella* sp. mesmo com temperaturas médias mais amenas que nas outras repetições e maior umidade das amostras. Somente nesse caso foi possível atingir o padrão Classe A da Resolução nº 375/2006 do Conama para o parâmetro *Salmonella* sp.

Lima (2010) obteve ausência de *Salmonella* sp. no Ciclo 1 aos 28 dias de monitoramento (umidade do lodo em torno de 21%), sendo que os lodos digeridos utilizados nos Ciclos 2 e 3 já apresentavam ausência de *Salmonella* sp.

5.8 RESULTADOS PARA COLIFORMES TERMOTOLERANTES

São apresentados na Tabela 22 os resultados referentes às análises de coliformes termotolerantes realizadas em intervalos regulares de 14 dias para as três repetições do experimento.

Ressalta-se que o único resultado que se enquadra como padrão Classe A da Resolução nº 375/2006 do Conama para o parâmetro Coliforme Termotolerante foi do LC2 na Repetição 2 com valor igual a $4,30E+02$ NMP/g ST e que sofreu uma redução de até 5 unidades logarítmicas durante o experimento conforme mostra a Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados da densidade de coliformes termotolerantes para as amostras de lodo dos leitos cobertos e descobertos durante as três repetições

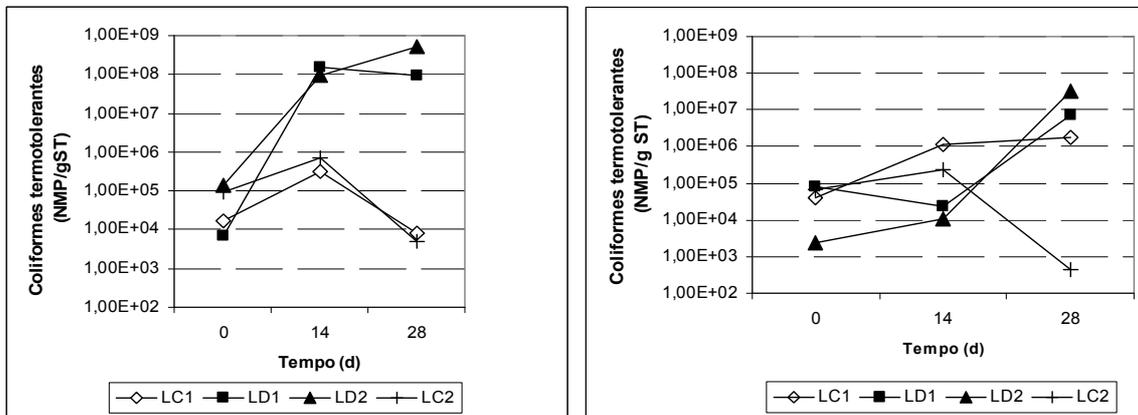
Data	Tempo (d)	Coliformes termotolerantes (NMP/g ST)			
		LC1	LD1	LD2	LC2
Repetição 1					
24/02/2012	0	1,70E+04	6,80E+03	1,40E+05	9,40E+04
09/03/2012	14	3,10E+05	1,60E+08	9,20E+07	7,00E+05
23/03/2012	28	7,80E+03	9,20E+07	5,40E+08	4,90E+03
Repetição 2					
27/03/2012	0	4,00E+04	7,80E+04	2,30E+03	6,80E+04
10/04/2012	14	1,10E+06	2,30E+04	1,10E+04	2,30E+05
24/04/2012	28	1,80E+06	7,00E+06	3,20E+07	4,30E+02
Repetição 3					
27/04/2012	0	1,50E+06	2,10E+06	2,50E+06	1,10E+06
11/05/2012	14	8,30E+04	1,60E+04	1,80E+05	3,80E+03
25/05/2012	28	3,50E+04	6,30E+04	2,30E+03	3,60E+03

Pode-se observar na Figura 19 uma grande variabilidade de resultados entre as repetições e também entre os leitos de uma mesma repetição para as análises de coliformes termotolerantes.

Os aumentos no número de coliformes podem estar associados a recrescimentos, pois, assim como a bactéria *Salmonella*, o grupo coliforme termotolerante ao encontrar ambientes favoráveis de temperatura e umidade pode multiplicar-se.

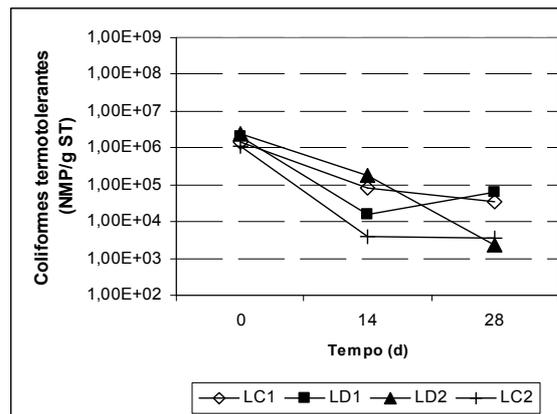
Ainda, segundo Comparini (2010) soma-se a isso o fato do ciclo reprodutivo da bactéria ser muito curto e com isso a variação populacional é constante. Neste estudo existiu ainda o fato da temperatura da massa de lodo não ter sido elevada suficientemente para a letalidade das bactérias, ou seja, não alcançou 50°C por no mínimo 60 minutos segundo Tchobanoglous; Burton; Stensel (2003).

Figura 19 - Resultados das análises de coliformes termotolerantes do lodo nos leitos cobertos (LC1 e LC2) e nos leitos descobertos (LD1 e LD2) durante as Repetições 1 (a), 2 (b) e 3 (c)



a) Repetição 1

b) Repetição 2



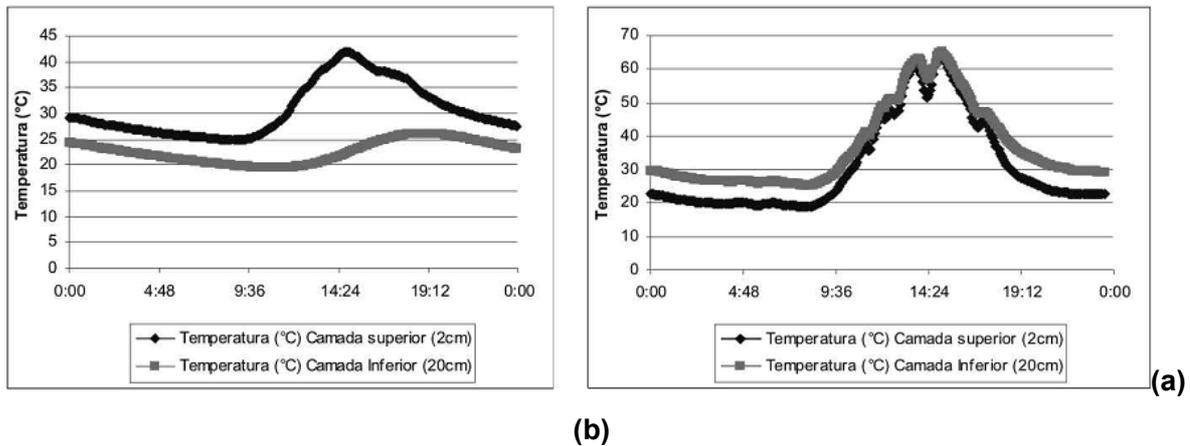
c) Repetição 3

Vale ressaltar que mesmo alcançando temperaturas do ar próximas a 50°C dentro dos módulos de estufa, a massa de lodo demonstra resistência em aquecer e transmitir o calor.

De acordo com Andreoli (2001), durante o tratamento em estufa agrícola é criado um gradiente térmico na massa de lodo, onde as temperaturas superiores são relativamente mais elevadas que as inferiores. Testes isolados de temperatura no perfil do lodo realizados por esse autor comprovam o gradiente, pois as camadas superficiais são mais influenciadas pelo calor gerado pela energia solar e pelo efeito estufa. A

Figura 20 mostra alguns dos resultados obtidos por esse autor em leitos de secagem cobertos com vidro transparente e com uma abertura para renovação limitada de ar.

Figura 20 - Perfis da temperatura em leitos de secagem com renovação de ar limitada: (a) baixa taxa e alta umidade do lodo (18 kgSST.m⁻², 68%) e (b) baixa taxa e baixa umidade do lodo (18 kgSST.m⁻², 11%)



Fonte: Andreoli (2001).

No estudo com estufa agrícola conduzido por Lima (2010), o padrão Classe A para Coliformes Termotolerantes foi atingido no 28º dia de monitoramento (umidade média de 21%) no ciclo 1 e, no 14º dia de monitoramento (umidade em torno de 64%) no ciclo 2.

De acordo com os autores Carrington (2001) e Koné *et al.* (2007), a rápida redução dos teores de umidade da massa de lodo favorece a inativação dos microorganismos mas não se configura fator suficiente para diminuição dos organismos patogênicos dos lodos de esgotos a níveis desejados.

Os resultados completos das análises de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), relação entre sólidos voláteis e sólidos totais (SV/ST), *Salmonella sp.*, ovos viáveis de helmintos (OVH) e coliformes termotolerantes (CTt) durante as três repetições do experimento, encontram-se no Apêndice F.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados obtidos na pesquisa conclui-se que:

O lodo de descarte da ETE Castelo possui teor médio de ST de 3,5%, sendo observados valores maiores no início da descarga e menores ao final. O teor de sólidos voláteis em relação aos sólidos totais (SV/ST) foi de aproximadamente 62% no início dos experimentos atingindo valores da ordem de 52% ao final dos 28 dias de tratamento. As amostras de lodo do dia do descarte dos reatores UASB apresentaram densidades de coliformes termotolerantes da ordem de 10^5 NMP/gST, densidade média de 7,8 OVH/gST e ausência de *Salmonella sp.*

Em relação à temperatura do ar, não houve diferença estatisticamente significativa entre os dois leitos cobertos, no entanto, pode-se verificar diferença entre as temperaturas para ambos os leitos cobertos em relação aos descobertos. As temperaturas dentro dos leitos cobertos com módulos de estufa agrícola ficaram ligeiramente acima das temperaturas nos leitos descobertos, sendo que a maior amplitude observada nas temperaturas máximas foi de 8,6°C.

Foi possível verificar que apesar do aumento da produtividade do leito de secagem estar diretamente relacionada com o aumento da taxa de sólidos totais aplicada, ocorre uma tendência inversa em relação ao incremento de sólidos totais, ou seja, quanto maior a taxa de sólidos totais aplicada maior a umidade final da amostra.

Em relação à cobertura do leito (estufa agrícola), o leito coberto 1, que apresentava menores taxas de sólidos totais aplicadas, foi o que obteve melhores resultados no incremento de ST, alcançando teores de umidade final da amostra de até 6,8%, representando diferença estatisticamente significativa em relação a todos os outros leitos de secagem.

Para os parâmetros microbiológicos, ao final dos 28 dias do experimento foi constatado que: apenas o leito coberto 2 na repetição 2 apresentou resultados de coliformes termotolerantes abaixo de 10^3 NMP/gST; apenas na repetição 3 obteve-se ausência de

Salmonella em todos os quatro leitos de secagem e, por fim, as reduções nas concentrações de ovos viáveis de helmintos não foram suficientes para enquadrar o biossólido como Classe A conforme estabelecido pela Resolução n° 375/2006 do Conama.

Como forma de subsidiar novas pesquisas com lodo de esgoto gerado em reatores UASB, para fins de uso agrícola, recomenda-se:

- Estudar o potencial de queima do biogás gerado nos reatores UASB, dentro dos módulos de estufa, permitindo um aumento da temperatura da massa de lodo;
- Realizar o experimento de higienização em estufa agrícola, para lodo gerado em reatores UASB, em períodos de tempo maiores que 28 dias;
- Monitorar o lodo tratado, por determinados períodos, para garantia das condições microbiológicas estabelecidas na Resolução n° 375/2006 do Conama para padrão Classe A.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: **Resíduos sólidos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2004a.

_____. NBR 10.007: **Amostragem de resíduos sólidos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2004b.

_____. NBR 12.209: **Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro, 2011.

ALEM SOBRINHO, P.; SAMUDIO, E.M.M. **Desidratação de lodos de reator UASB em leitos de secagem**: determinação de parâmetros. In: Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 25. México, D.F., 1996. 9p.

ALEM SOBRINHO, P. Tratamento de esgoto e geração de lodo. In: _____, **Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto**. BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. eds. Jaguariúna: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. p.11-24.

ALMEIDA, G. C.; FANHANI, J. C.; D'OLIVEIRA, P. S.; DIAS FILHO, B. P. **Eficiência dos processos químico e térmico na higienização de lodo de esgoto**. Iniciação Científica CESUMAR - Jan./Jun. 2006, Vol 08, n.01, pp. 95-99. 2006.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Hidroweb – Sistema de informações hidrológicas. Disponível em: < <http://hidroweb.ana.gov.br/> >. Acesso em: 26 mar. 2012.

ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I; FERNANDES, F. **Reciclagem de bio-sólidos**: transformando problemas em soluções. Curitiba: Sanepar, Finep, 1999.

ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; TELES, C. R.; CHERUBINI, C.; BERNET, P. M.; FAVARIN, F.; DE CASTRO, L. R. **Avaliação da eficiência do uso de estufa plástica, revolvimento de lodo e injeção de calor na secagem e desinfecção de lodo anaeróbico em leito de secagem**. In: IX SILUBESA – Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Seguro-Ba, 2000.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgoto: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. v. 6, 484 p.

ANDREOLI, C.V. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001.

APHA - American Public Health Association; AWWA - American Water Works Association & WPCF - Water Pollution Control Federation, 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21 st ed. Washington, DC.

ARGEL, K. D. R. V. **Caracterização de cenários de exposição a perigos microbiológicos relacionados ao uso agrícola de biossólidos**: 2010, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. Programa de Pós-Graduação em medicina Veterinária, 2010.

ARTHURSON, V. 2008. **Proper sanitization of sewage sludge: a critical issue for a sustainable society**. Applied Environment Microbiology. 74(17): 5267-5275.

BARREIROS, R. M. **Modificações na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação com lodo de esgoto tratado**: 2005, Tese - Universidade de São Paulo. Escola superior de agricultura “Luiz de Queiroz”, 2005.

BERNARDES, R.S.; CAIXETA, D.M.; MORAES, L.R.C. **Desinfecção de água por exposição à luz solar**. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 4, n. 1-2, p.7-10. Jan./mar., abr./jun. 1999.

BOF, V.S. **Desempenho de um sistema formado pela associação em série de um reator UASB e biofiltro aerado submerso tratando esgoto sanitário sob condições dinâmicas de carga e retorno de lodo aeróbio para o UASB**: 1999, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo. Programa de Pós graduação em Engenharia Ambiental, 1999.

BORGES, E. S. M; GODINHO, V. M.; BEJAR, D. O; CHERNICHARO, C. A. L. (2009) **Tratamento térmico de lodo anaeróbio com utilização do biogás gerado em**

reatores UASB: avaliação da autossustentabilidade do sistema e do efeito sobre a higienização e a desidratação do lodo. Engenharia Sanitária e Ambiental. v.14 n.3. 337-346.

BUENO, R.C .R. **Biossólido:** processo de redução adicional de patógenos com a utilização de energia solar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa, PB. Anais eletrônicos: ABES/SC, 2001.

BRASIL - Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 375/2006 do Conama que dispõe sobre a Regulamentação do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf> >. Acesso em: 12 mai. 2011.

CAMPOS, J. R. *et al.* **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**, PROSAB/FINEP, 1999.

CARRINGTON, E. G. **Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction.** Luxembourg: European Communities, 2001. 44 p. (Final Report).

CASTRO, C. G. de; BEYRODT; C. G. P. **Ações da enfermagem na prevenção de parasitoses intestinais em creches.** Revista Enfermagem UNISA. Universidade de Santo Amaro, 2003; 4: 76-80.

CETESB. *Coliformes fecais - Determinação em amostras de água pela técnica de tubos múltiplos com meio A1 - Método de ensaio.* Norma Técnica CETESB L5-406, 1992, 20 p.

CHAGAS, W. F. **Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienizado para fins agrícolas, das estações de tratamento de esgotos da Ilha do Governador e da Penha no estado do Rio de Janeiro:** 2000, Dissertação (Mestrado) - Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 2000.

CHERUBINI, C.; ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; CARNEIRO, C. **Secagem e higienização do lodo de esgoto anaeróbio em leitos de secagem através da**

solarização. In: VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Vitória, Espírito Santo. 2002.

COMPARINI, J. B. **Estudo do decaimento de patógenos estocados em valas e em biossólidos submetidos à secagem em estufa agrícola:** 2001, Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

CORDEIRO, J. S. Remoção de água de lodos de ETAs através de filtração forçada. In: REALI, M.A.P. (Coord.). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água.** Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 107 – 124. PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico.

CRIBARI, B. S. **Secagem térmica do lodo de esgoto gerado em uma estação de tratamento do tipo UASB + biofiltros aerados submersos:** 2004, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo. Departamento de Engenharia Ambiental, 2004.

DEBOSZ, K. et al. **Evaluating effects of sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties.** Applied Soil Ecology, Amsterdam, v.19, n.3, p.237-248, March 2002.

DIAS, E. H. O. **Tratamento de lodo de esgoto por secagem em estufa: higienização e produção de biossólidos para uso agrícola.** 2012. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2012.

FERNANDES, F (Coord.). **Uso e manejo do lodo de esgotos na agricultura.** Rio de Janeiro: RiMa, ABES. 1999. 98 p.

FERREIRA, A.C. **Monitoramento do uso de estufa plástica e aproveitamento do biogás na secagem e desinfecção de lodo anaeróbio em leito de secagem.** Curitiba, 2001. Dissertação de Mestrado: Departamento de solos do setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

GIBSON, T.S.; CHAN, K.Y.; SHARMA, G. SHEARMAN, R. **Soil carbon sequestration utilising recycled organics**. Sydney: NSW Agriculture, 2002. 95p.

GONÇALVES, R. F.; DA SILVA, A. L. B.; PASSAMANI, F. R. F.; SPAVIER, L. C.; CRIBARI, B. S. **Influência da difusividade térmica na eficiência da Pasteurização de lodos de esgoto**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa, PB. Anais eletrônicos: ABES/SC, 2001.

GUEDES, M. C. **Ciclagem de nutrientes após aplicação de lodo de esgoto (biossólido) sobre latossolo cultivado com *Eucalyptus Grandis***. 2005. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRARIA E ESTATÍSTICA. **Relatório de estação geodésica** - Projeto Base de Dados do SGB. 2012. Disponível em: <<http://www.bdg.ibge.gov.br/bdg/pdf/relatorio.asp?L1=93702>>. Acesso em: 20 fev. 2012.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRARIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2010**. Disponível em: http://www.censo2010.ibge.gov.br/dados_divulgados/>. Acesso em: 20 fev. 2012.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 4ª edição. Rio de Janeiro, 2005. 932 p.

KONÉ, D.; COFIE, °; ZURBRUGG, C.; GALLIZZI, K.; MOSER, D.; DRESCHER, S.; STRAUSS, M. **Helminth eggs inactivation efficiency by faecal sludge dewatering and co-composting in tropical climates**. Water Research, v. 41, p. 4397-4402, 2007.

LIMA, M. R. P. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto**: 2010, Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, 2010.

LIMA, M. de F. de; MATTOS, C. N. de; VIEIRA, P. L. C.; ALMEIDA, L. F. de. **Geração de lodo de esgoto e seu potencial como fonte de matéria orgânica para a agricultura**.

In:_____. **Manual de uso agrícola e disposição do lodo de esgoto para o estado do Espírito Santo**. Vitória: Incaper, 2011. cap. 1, p. 11–17.

MALTA, T. S. **Aplicação de Lodos de Estações de Tratamento de Esgotos na agricultura**: Estudo do caso do Município de Rio das Ostras –RJ: 2001, Dissertação – Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública, 2001.

MARQUES, M. O.; MELO, W. J.; MARQUES, T. A. **Metais pesados e o uso de biossólido na agricultura**. In: TSUTIYA, M. T. et al. Biossólidos na agricultura. 2 ed. São Paulo: Abes/SP, 2002. cap. 12, p. 365-403.

MELO, A. S. de. **Contribuição para o dimensionamento de leitos de secagem de lodo**: 2006, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Ciências e Tecnologia, 2006.

NEVES, David Pereira. **Parasitologia humana**. 11. Ed. São Paulo: Editora Atheneu, 2005. 494p.

PALMA JÚNIOR, A. A. de.; FÁBRIS, V. **Diagnóstico do sistema de esgotamento sanitário do município de Castelo**. Relatório operacional da Companhia Espírito Santense de Saneamento. 2011.

PASSAMANI, R. F. **Remoção de coliformes fecais e ovos de helmintos em uma ETE do tipo UASB + biofiltro aerado submerso tratando esgoto sanitário e em lodo anaeróbio submetido à higienização por caleagem ou por pasteurização**: 2001, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Departamento de Engenharia Ambiental, 2001.

PECSON, B .M.; NELSON, K .L. **The effects of exposure time, temperature, pH, and ammonia concentration on the inactivation rate of ascaris eggs**. [198-?]. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/ascaris.pdf>>. Acessado em: 29 mar. 2012.

POGGIANI, F.; GUEDES, M.C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: I. reflexo no ciclo dos nutrientes. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.

A. (Ed). **Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, cap.8, p.163-178, 2000.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CASTELO. Disponível em:
<http://www.castelo.es.gov.br/site/>. Acesso em: 20 fev. 2012.

RAMALDES, D. L. DA CUNHA. **Estudo da aptidão à desidratação de lodo produzido em uma ETE tipo reator anaeróbio de fluxo ascendente – UASB**: 2001, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo. Departamento de Engenharia Ambiental, 2001.

RIDDELL-BLACK, D. **Development of a water industry manual for biosolids use in short rotation forestry**. Biomass and Bioenergy, Oxford, v.15, n.1, p.101-107, Jan. 1998.

ROCHA, A. N. C. L. **Higienização de lodo anaeróbio por meio alcalino: Estudo de caso da ETE Lages – Aparecida de Goiânia – GO**: 2009, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás. Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, 2009.

SALIHOGU, N. K.; PINARLI, V.; SALIHOGU, G. **Solar drying in sludge management in Turkey**. Renewable Energy, v.32, p.1661–1675, 2007.

SILVA, R. F. da. **Compostagem e solarização para higienização de lodo de esgoto e uso no cultivo de cássia amarela (Senna siamea Lam)**. 2007. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, PE.

SOARES, S. R. A.; MATTOS, Z. M. R. DE; BERNARDES, R. S. **Modelagem do processo de desidratação de lodo anaeróbio em leitos de secagem simulados**. (2001). Revista Brasileira de engenharia Agrícola e Ambiental. V.5, n.2, p.313-319.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4th ed. Metcalf & Eddy. Inc. New York: McGraw-Hill, 2003. 1819 p.

TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; ALÉM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. **Biossólidos na agricultura**. 2. Ed. São Paulo: Abes/SP, 2002. 468 p.

US EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge (including domestic septage)**. Environmental regulations and technology. Under 40 CFR Part 503. S.1.: EPA, 2003. (EPA 625/R-92/013).

VAN HAANDEL. A. C.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos: Um manual para regiões de clima quente**. Campina Grande, 1994.

YEAGER J.G.; WARD R. L. (1981). **Effects of moisture content on long-term survival and regrowth of bacteria in wastewater sludge**. Appl Environ Microbiol 41:1117-1122.

ZALESKI, K. J.; JOSEPHSON, K. L., GERBA, C.P.; PEPPER, I. L. (2005). **Potential regrowth and recolonization of Salmonella and indicators in biosolids and biosolid amended soil**. Appl. Environ. Microbiol. 71:3701–3708.

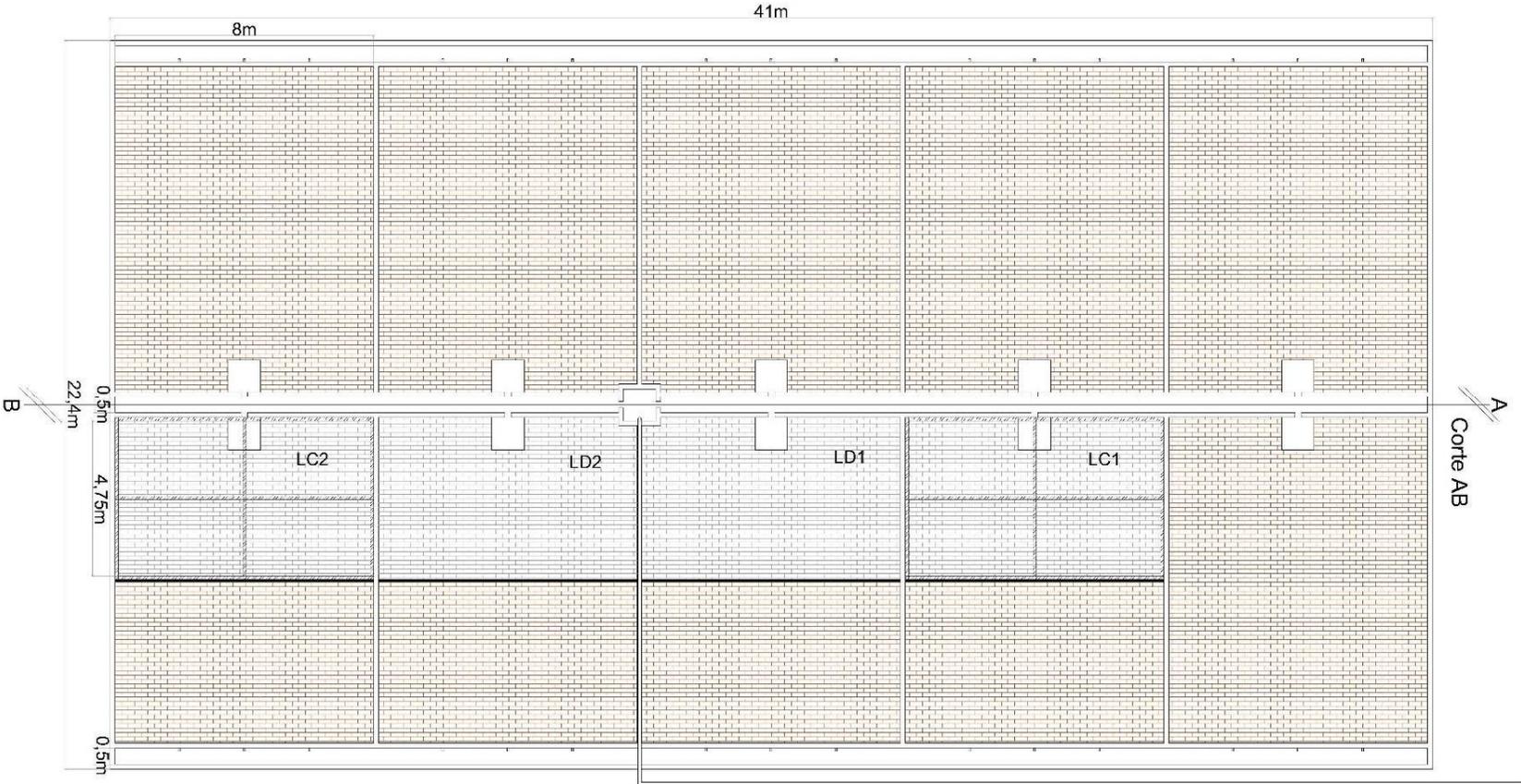
ZHANG, H. Using biosolids as a plant nutrient source. [200-X]: 1-4. Disponível em: <http://osufacts.okstate.edu>. Acessado em: 10 out. 2012.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Caracterização do afluente e efluente da ETE Castelo

Parâmetro	Afluente						Efluente					
	n	média	máx	Mín	s ²	CV	n	média	máx	mín	s ²	CV
Coliformes termotolerantes (Col/100mL)	12	3,7x10 ⁷	6,2x10 ⁷	1,9x10 ⁷	1,7x10 ⁷	0,46	12	4,9x10 ⁶	8,2x10 ⁶	3,0x10 ⁶	2,3x10 ⁶	0,47
DBO ₅ (mgO ₂ /L)	9	500	850	90	2,2x10 ²	0,44	9	51,6	100	16	21,7	0,42
DQO (mgO ₂ /L)	13	846,2	1200	250	247	0,29	13	263,1	450	80	90,7	0,34
Fósforo total (mg P/L)	13	7,0	12,2	1,8	2,5	0,36	13	7,2	9,7	5,2	1,3	0,17
Nitrato (mg N-NO ₃ /L)	13	0,1	0,1	0	3,7x10 ⁻²	0,67	13	0,1	0,1	0	0,05	0,67
Nitrito (mg N-NO ₂ /L)	13	<0,01	<0,01	0	3,1x10 ⁻⁴	0	13	0,1	0,2	0	0,15	1,42
Nitrogênio amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	13	35,3	47	12	9	0,25	13	65	85	55	8,7	0,13
Nitrogênio Kjeldahl (mg N/L)	12	55,8	90	17	17,1	0,31	12	73,3	90	60	9,6	0,13
Nitrogênio total (mg N/L)	12	55,4	90	17	16,5	0,3	13	73,3	90	60	9,6	0,13
Óleos e graxas (mg/L)	13	207,3	1375	60	351,9	1,7	13	24,2	40	7	10	0,41
Oxigênio dissolvido (mg/L)	8	<0,1	<0,1	<0,1	0	0	8	2,6	3,5	0,5	0,9	0,34
pH	12	6,8	7	6,7	9,3x10 ⁻²	0,01	12	7,0	7,2	6,7	0,1	0
SS (mL/L)	11	6,5	17	3	4,4	0,7	12	2,5	3	2	0,7	0,28
SST (mg/L)	13	371	1513,3	90	352,9	0,95	13	97,3	203,6	24	53,3	0,55
ST (mg/L)	13	768,3	2000	282	421,1	0,55	13	384	540	38	148	0,38
Turbidez (NTU)	12	135,4	300	55	58,4	0,43	12	42,2	130	16	29,1	0,69

APÊNDICE B - Planta baixa dos dez leitos de secagem da ETE Castelo



APÊNDICE C - Temperaturas registradas nos leitos cobertos, descobertos e no Ambiente nas Repetições 1, 2 e 3

Repetição 1

Data	Tempo (d)	Leito coberto 1 (LC1)			Leito coberto 2 (LC2)			Leitos Descobertos (LD1 e LD2)			Ambiente (sombra)		
		Temperatura (°C)			Temperatura (°C)			Temperatura (°C)			Temperatura (°C)		
		Min	Max	Média	Min	Max	Média	Min	Max	Média	Min	Max	Média
24/02/2012	0	22,4	40,5	31,5	22,7	41,2	32,0	22,5	40,6	31,6	21,9	35,7	28,8
25/02/2012	1	23,4	41,6	32,5	24,0	42,3	33,2	23,6	40,0	31,8	24,7	36,4	30,6
26/02/2012	2	22,8	40,7	31,8	22,8	41,2	32,0	22,6	42,2	32,4	22,2	37,0	29,6
27/02/2012	3	20,7	41,5	31,1	20,2	42,0	31,1	26,2	43,5	34,9	19,6	37,4	28,5
28/02/2012	4	20,9	42,0	31,5	20,2	42,9	31,6	22,3	40,0	31,2	21,1	36,4	28,8
29/02/2012	5	20,2	43,2	31,7	21,4	42,4	31,9	21,1	42,7	31,9	20,6	36,4	28,5
01/03/2012	6	25,5	43,6	34,6	25,3	42,1	33,7	25,5	42,9	34,2	26,3	37,5	31,9
02/03/2012	7	19,8	43,9	31,9	20,2	45,7	33,0	20,0	44,4	32,2	19,6	38,5	29,1
03/03/2012	8	20,8	45,7	33,3	20,7	42,9	31,8	20,4	42,9	31,7	19,8	38,4	29,1
04/03/2012	9	20,8	45,7	33,3	20,7	42,9	31,8	20,4	42,9	31,7	19,6	38,5	29,1
05/03/2012	10	21,7	45,0	33,4	21,9	44,3	33,1	21,0	42,5	31,8	21,4	34,4	27,9
06/03/2012	11	21,2	43,7	32,5	21,3	42,5	31,9	20,8	41,6	31,2	20,3	34,6	27,5
07/03/2012	12	21,7	42,6	32,2	21,3	40,5	30,9	20,8	41,6	31,2	20,3	34,6	27,5
08/03/2012	13	22,2	43,4	32,8	22,2	41,1	31,7	22,4	41,6	32,0	22,0	34,6	28,3
09/03/2012	14	21,9	44,2	33,1	22,3	43,6	33,0	22,2	42,0	32,1	21,6	34,0	27,8
10/03/2012	15	21,9	43,5	32,7	22,5	41,1	31,8	22,2	40,5	31,4	21,6	33,5	27,6
11/03/2012	16	22,5	43,7	33,1	23,0	41,6	32,3	23,0	41,7	32,4	21,6	34,3	28,0
12/03/2012	17	22,5	43,7	33,1	23,0	41,8	32,4	23,1	41,7	32,4	21,6	34,3	28,0
13/03/2012	18	22,2	42,7	32,5	22,4	40,9	31,7	22,8	40,4	31,6	22,3	33,0	27,7
14/03/2012	19	25,7	43,0	34,4	25,6	41,1	33,4	26,2	40,7	33,5	25,8	34,1	30,0
15/03/2012	20	24,7	44,0	34,4	24,6	42,6	33,6	24,8	42,0	33,4	24,3	34,9	29,6
16/03/2012	21	21,9	44,0	33,0	22,0	42,6	32,3	21,7	42,0	31,9	21,3	34,9	28,1
17/03/2012	22	21,4	37,9	29,7	21,5	35,5	28,5	21,4	32,8	27,1	20,1	26,3	23,2
18/03/2012	23	21,3	29,8	25,6	21,3	29,1	25,2	21,2	27,9	24,6	20,0	25,0	22,5
19/03/2012	24	21,3	30,6	26,0	21,1	29,8	25,5	21,1	27,9	24,5	20,3	25,0	22,7
20/03/2012	25	21,1	32,8	27,0	21,1	31,8	26,5	21,1	30,1	25,6	20,0	27,1	23,6
21/03/2012	26	21,7	41,5	31,6	22,0	40,0	31,0	22,0	39,0	30,5	21,2	33,4	27,3
22/03/2012	27	23,2	44,1	33,7	23,4	42,8	33,1	23,4	41,8	32,6	22,9	36,2	29,6
23/03/2012	28	23,4	44,2	33,8	23,6	42,9	33,3	23,5	41,9	32,7	23,1	36,3	29,7
	Média	22,1	41,8	32,0	22,2	40,7	31,5	22,4	40,1	31,2	21,6	34,2	27,9

Repetição 2

Data	Tempo (d)	Leito coberto 1 (LC1)			Leito coberto 2 (LC2)			Leitos Descobertos (LD1 e LD2)			Ambiente (sombra)		
		Temperatura (°C)			Temperatura (°C)			Temperatura (°C)			Temperatura (°C)		
		Min	Max	Média	Min	Max	Média	Min	Max	Média	Min	Max	Média
27/03/2012	0	22,4	44,2	33,3	23,2	45,7	34,5	22,8	38,5	30,7	22,9	34,2	28,6
28/03/2012	1	22,3	42,6	32,5	22,8	45,7	34,3	21,6	39,5	30,6	20,9	34,2	27,6
29/03/2012	2	22,1	34,3	28,2	22,5	36,4	29,5	21,5	31,0	26,3	19,8	24,8	22,3
30/03/2012	3	23,5	41,2	32,4	23,4	41,0	32,2	22,5	35,9	29,2	23,0	23,1	23,1
31/03/2012	4	23,1	42,9	33,0	23,1	42,8	33,0	22,3	36,7	29,5	21,6	30,8	26,2
01/04/2012	5	23,1	42,9	33,0	23,1	42,8	33,0	22,6	36,7	29,7	21,6	30,8	26,2
02/04/2012	6	22,3	43,5	32,9	22,8	43,0	32,9	21,7	36,6	29,2	21,4	30,4	25,9
03/04/2012	7	21,8	44,8	33,3	22,4	43,7	33,1	21,2	37,9	29,6	20,0	31,6	25,8
04/04/2012	8	21,8	46,7	34,3	22,4	45,8	34,1	21,2	38,8	30,0	20,0	31,6	25,8
05/04/2012	9	21,7	47,3	34,5	22,3	45,9	34,1	21,2	39,8	30,5	20,0	34,0	27,0
06/04/2012	10	21,8	48,2	35,0	22,6	48,7	35,7	21,5	43,4	32,5	20,9	34,3	27,6
07/04/2012	11	21,8	41,3	31,6	22,6	41,3	32,0	21,5	34,9	28,2	21,0	28,6	24,8
08/04/2012	12	21,8	43,3	32,6	22,6	44,9	33,8	21,4	37,5	29,5	19,9	30,0	25,0
09/04/2012	13	21,0	44,0	32,5	21,6	44,9	33,3	20,0	38,9	29,5	19,7	30,1	24,9
10/04/2012	14	21,3	46,6	34,0	22,3	46,7	34,5	20,8	38,1	29,5	19,8	29,5	24,7
11/04/2012	15	22,1	47,0	34,6	21,6	43,7	32,7	20,9	38,7	29,8	19,8	30,1	25,0
12/04/2012	16	21,4	47,6	34,5	22,0	46,9	34,5	20,0	39,0	29,5	19,8	30,0	24,9
13/04/2012	17	21,0	47,8	34,4	21,6	47,0	34,3	19,7	39,6	29,7	19,5	31,8	25,7
14/04/2012	18	20,6	48,0	34,3	21,3	47,1	34,2	19,5	40,3	29,9	19,3	33,7	26,5
15/04/2012	19	24,4	49,6	37,0	23,0	48,6	35,8	23,4	42,6	33,0	22,8	34,6	28,7
16/04/2012	20	21,3	49,6	35,5	22,2	48,3	35,3	20,9	42,6	31,8	20,5	34,6	27,6
17/04/2012	21	19,8	49,6	34,7	20,5	48,3	34,4	18,8	42,6	30,7	18,7	34,6	26,7
18/04/2012	22	19,3	41,4	30,4	19,2	42,1	30,7	18,3	37,5	27,9	17,9	29,3	23,6
19/04/2012	23	19,9	44,1	32,0	18,9	45,5	32,2	17,7	36,4	27,1	17,1	26,7	21,9
20/04/2012	24	19,8	43,8	31,8	19,1	45,1	32,1	19,4	36,4	27,9	17,0	26,3	21,7
21/04/2012	25	17,6	47,0	32,3	18,0	46,8	32,4	16,3	40,4	28,4	16,2	32,7	24,5
22/04/2012	26	22,7	46,4	34,6	23,1	46,6	34,9	21,3	38,4	29,9	20,5	29,9	25,2
23/04/2012	27	21,6	28,5	25,1	22,4	28,2	25,3	21,4	24,5	23,0	20,7	22,3	21,5
24/04/2012	28	22,1	29,0	25,6	22,7	29,6	26,2	21,9	25,0	23,5	21,0	22,8	21,9
	Média	21,6	43,9	32,7	21,9	43,9	32,9	20,8	37,5	29,2	20,1	30,3	25,2

Repetição 3

Data	Tempo (d)	Leito coberto 1 (LC1)			Leito coberto 2 (LC2)			Leitos Descobertos (LD1 e LD2)			Ambiente (sombra)		
		Temperatura (°C)			Temperatura (°C)			Temperatura (°C)			Temperatura (°C)		
		Min	Max	Média	Min	Max	Média	Min	Max	Média	Min	Max	Média
27/04/2012	0	21,6	49,0	35,3	21,9	41,2	31,6	21,4	50,9	36,2	20,7	33,0	26,9
28/04/2012	1	21,2	41,0	31,1	21,4	41,2	31,3	21,4	50,9	36,2	20,7	33,0	26,9
29/04/2012	2	21,2	41,0	31,1	21,4	41,2	31,3	21,4	50,9	36,2	20,7	33,0	26,9
30/04/2012	3	21,7	39,1	30,4	21,8	42,6	32,2	21,2	36,6	28,9	20,6	30,0	25,3
01/05/2012	4	18,6	28,4	23,5	18,1	29,6	23,9	17,3	26,5	21,9	16,6	23,2	19,9
02/05/2012	5	17,2	35,6	26,4	16,7	36,1	26,4	15,7	30,4	23,1	16,0	23,9	20,0
03/05/2012	6	17,2	36,5	26,9	16,7	38,5	27,6	15,7	33,3	24,5	16,0	26,5	21,3
04/05/2012	7	20,6	34,4	27,5	21,0	33,6	27,3	19,2	30,2	24,7	19,0	24,3	21,7
05/05/2012	8	20,8	36,8	28,8	21,1	36,9	29,0	19,5	33,2	26,4	19,2	26,1	22,7
06/05/2012	9	19,6	40,5	30,1	19,9	39,8	29,9	18,5	34,0	26,3	18,1	20,8	19,5
07/05/2012	10	19,5	34,9	27,2	19,6	36,5	28,1	18,5	33,4	26,0	18,1	26,3	22,2
08/05/2012	11	19,4	26,6	23,0	18,8	26,5	22,7	19,3	21,3	20,3	18,2	20,3	19,3
09/05/2012	12	19,8	35,1	27,5	20,0	36,5	28,3	18,5	32,6	25,6	18,4	24,9	21,7
10/05/2012	13	20,0	40,5	30,3	19,5	38,7	29,1	18,3	34,5	26,4	17,9	27,6	22,8
11/05/2012	14	18,0	38,4	28,2	18,0	40,1	29,1	16,9	36,8	26,9	16,5	28,8	22,7
12/05/2012	15	18,8	41,8	30,3	19,5	42,7	31,1	17,4	38,3	27,9	17,0	33,2	25,1
13/05/2012	16	19,1	35,1	27,1	19,3	26,5	22,9	17,9	29,1	23,5	17,6	20,9	19,3
14/05/2012	17	19,5	25,8	22,7	19,4	25,7	22,6	18,0	23,4	20,7	17,5	20,9	19,2
15/05/2012	18	18,6	25,8	22,2	18,0	25,7	21,9	17,5	23,4	20,5	17,1	20,9	19,0
16/05/2012	19	18,4	25,7	22,1	18,2	25,1	21,7	17,7	22,9	20,3	17,3	20,3	18,8
17/05/2012	20	18,2	26,1	22,2	18,8	26,6	22,7	17,5	24,7	21,1	17,1	23,1	20,1
18/05/2012	21	18,4	37,8	28,1	18,4	38,8	28,6	17,4	30,6	24,0	17,0	24,7	20,9
19/05/2012	22	17,6	37,8	27,7	17,9	38,8	28,4	16,8	30,6	23,7	16,4	20,1	18,3
20/05/2012	23	16,8	36,0	26,4	17,4	37,4	27,4	16,0	31,7	23,9	15,9	24,0	20,0
21/05/2012	24	17,1	35,8	26,5	18,1	35,9	27,0	16,3	31,7	24,0	16,6	22,9	19,8
22/05/2012	25	17,0	39,6	28,3	17,9	42,0	30,0	16,0	32,9	24,5	15,4	25,5	20,5
23/05/2012	26	18,0	38,4	28,2	17,6	40,1	28,9	16,3	34,0	25,2	16,3	22,4	19,4
24/05/2012	27	18,1	40,1	29,1	18,2	41,4	29,8	17,0	34,1	25,6	16,6	27,0	21,8
25/05/2012	28	18,3	40,0	29,2	18,4	41,0	29,7	17,5	34,6	26,1	17,0	27,5	22,3
	Média	19,0	36,0	27,5	19,1	36,1	27,6	18,0	33,0	25,5	17,6	25,3	21,5

APÊNDICE D - Umidade relativa do ar registrada diariamente durante as três repetições do experimento

Tempo (d)	Umidade relativa do ar (%)														
	Data	Repetição 1				Data	Repetição 2				Data	Repetição 3			
		LC1	LC2	LD1 e LD2	Ambiente		LC1	LC2	LD1 e LD2	Ambiente		LC1	LC2	LD1 e LD2	Ambiente
0	24/02/12	57	62	58	57	27/03/12	59	57	63	54	27/04/12	69	71	77	78
1	25/02/12	43	58	48	53	28/03/12	89	91	92	92	28/04/12	87	87	92	88
2	26/02/12	42	53	47	57	29/03/12	88	90	92	92	29/04/12	86	86	91	88
3	27/02/12	44	62	66	71	30/03/12	89	89	92	92	30/04/12	82	84	86	92
4	28/02/12	52	43	47	54	31/03/12	89	92	92	92	01/05/12	92	92	92	95
5	29/02/12	43	60	46	55	01/04/12	83	87	92	92	02/05/12	92	92	92	89
6	01/03/12	41	53	43	48	02/04/12	71	75	87	92	03/05/12	90	92	92	92
7	02/03/12	64	57	51	59	03/04/12	87	90	92	92	04/05/12	89	91	92	92
8	03/03/12	53	61	57	61	04/04/12	67	73	90	70	05/05/12	92	92	92	92
9	04/03/12	61	80	67	79	05/04/12	62	66	78	80	06/05/12	92	92	92	92
10	05/03/12	61	82	70	85	06/04/12	81	84	92	92	07/05/12	90	91	92	92
11	06/03/12	73	77	77	79	07/04/12	88	92	92	92	08/05/12	92	92	92	92
12	07/03/12	60	76	67	75	08/04/12	88	91	92	92	09/05/12	92	92	92	92
13	08/03/12	58	77	77	76	09/04/12	76	81	91	92	10/05/12	92	92	92	92
14	09/03/12	62	75	76	88	10/04/12	78	83	90	92	11/05/12	92	92	92	92
15	10/03/12	69	70	78	81	11/04/12	81	84	91	92	12/05/12	90	90	90	90
16	11/03/12	53	67	67	65	12/04/12	65	71	86	92	13/05/12	92	92	92	92
17	12/03/12	59	60	62	58	13/04/12	52	57	72	59	14/05/12	92	92	92	92
18	13/03/12	57	58	58	57	14/04/12	39	44	58	57	15/05/12	92	92	92	92
19	14/03/12	46	56	56	54	15/04/12	83	89	88	91	16/05/12	92	92	92	92
20	15/03/12	76	79	80	78	16/04/12	90	92	92	92	17/05/12	92	92	92	92
21	16/03/12	75	79	87	92	17/04/12	59	67	81	87	18/05/12	75	80	82	92
22	17/03/12	91	92	92	92	18/04/12	62	68	82	91	19/05/12	92	92	92	92
23	18/03/12	91	92	92	92	19/04/12	82	89	92	92	20/05/12	85	87	92	91
24	19/03/12	92	92	92	92	20/04/12	81	90	92	92	21/05/12	89	91	92	92
25	20/03/12	74	81	86	90	21/04/12	76	83	89	87	22/05/12	89	92	92	92

continua

continuação

26	21/03/12	78	85	92	92	22/04/12	82	86	92	92	23/05/12	82	73	73	82
27	22/03/12	62	80	86	83	23/04/12	88	92	92	92	24/05/12	79	82	75	92
28	23/03/12	62	81	86	83	24/04/12	87	90	90	90	25/05/12	78	81	74	91
Média		62	71	69	73		77	81	87	87		88	88	89	91

APÊNDICE E - Precipitações pluviométricas diárias registradas durante as três repetições do experimento

Tempo (d)	Precipitação (mm)					
	Data	Repetição 1	Data	Repetição 2	Data	Repetição 3
0	24/02/2012	0	27/03/2012	0	27/04/2012	0
1	25/02/2012	0	28/03/2012	0	28/04/2012	0
2	26/02/2012	0	29/03/2012	75	29/04/2012	0
3	27/02/2012	0	30/03/2012	0	30/04/2012	10
4	28/02/2012	0	31/03/2012	20	01/05/2012	5
5	29/02/2012	0	01/04/2012	0	02/05/2012	0
6	01/03/2012	0	02/04/2012	0	03/05/2012	10
7	02/03/2012	0	03/04/2012	0	04/05/2012	7
8	03/03/2012	0	04/04/2012	12	05/05/2012	0
9	04/03/2012	0	05/04/2012	0	06/05/2012	0
10	05/03/2012	1	06/04/2012	10	07/05/2012	5
11	06/03/2012	0	07/04/2012	0	08/05/2012	7
12	07/03/2012	2	08/04/2012	0	09/05/2012	0
13	08/03/2012	0	09/04/2012	0	10/05/2012	0
14	09/03/2012	0	10/04/2012	0	11/05/2012	0
15	10/03/2012	0	11/04/2012	0	12/05/2012	0
16	11/03/2012	0	12/04/2012	0	13/05/2012	36
17	12/03/2012	0	13/04/2012	0	14/05/2012	34
18	13/03/2012	0	14/04/2012	0	15/05/2012	30
19	14/03/2012	0	15/04/2012	8	16/05/2012	2
20	15/03/2012	0	16/04/2012	0	17/05/2012	2
21	16/03/2012	46	17/04/2012	0	18/05/2012	9
22	17/03/2012	12	18/04/2012	0	19/05/2012	6
23	18/03/2012	5	19/04/2012	0	20/05/2012	0
24	19/03/2012	8	20/04/2012	0	21/05/2012	0
25	20/03/2012	0	21/04/2012	0	22/05/2012	0
26	21/03/2012	0	22/04/2012	10	23/05/2012	0
27	22/03/2012	0	23/04/2012	8	24/05/2012	0
28	23/03/2012	0	24/04/2012	0	25/05/2012	0
Total		74		143		163

APÊNDICE F - Resultados das análises de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), relação entre sólidos voláteis e sólidos totais (SV/ST), *Salmonella* sp., ovos viáveis de helmintos (OVH) e coliformes termotolerantes (CTt) durante as três repetições do experimento.

Leitos Cobertos – LC1 e LC2

Data	Tempo (d)	LC1						LC2					
		ST (mg/kg)	SV (mg/kg)	SV/ST (%)	CTt (NMP/gST)	<i>Salmonella</i> sp. (P ou A/10g)	OVH (ovo/gST)	ST (mg/kg)	SV (mg/kg)	SV/ST (%)	CTt (NMP/gST)	<i>Salmonella</i> sp. (P ou A/10g)	OVH (ovo/gST)
Repetição 1													
24/02/12	0	24800	15600	62,9	1,70E+04	Ausência	40	47000	28600	60,85	9,40E+04	Ausência	20
02/03/12	7	473500	208000	43,93		-	-	264000	151900	57,54		-	-
09/03/12	14	773500	388900	50,28	3,10E+05	Presença	525	356600	191900	53,81	7,00E+05	Presença	235
16/03/12	21	908800	493000	54,25		-	-	441800	214400	48,53		-	-
23/03/12	28	932100	490800	52,66	7,80E+03	Presença	1,2	620300	330500	53,28	4,90E+03	Ausência	5,2
Repetição 2													
27/03/12	0	29700	18700	62,96	4,00E+04	Ausência	0,3	49600	30300	61,09	6,80E+04	Ausência	0
03/04/12	7	317300	185000	58,3		-	-	285200	169500	59,43		-	-
10/04/12	14	453700	267900	59,05	1,10E+06	Ausência	85	247500	163500	66,06	2,30E+05	Presença	33
17/04/12	21	770000	414300	53,81		-	-	382000	213200	55,81		-	-
24/04/12	28	876500	426300	48,64	1,80E+06	Presença	2,6	435000	218400	50,21	4,30E+02	Presença	0,6
Repetição 3													
27/04/12	0	30500	19300	63,28	1,50E+06	Ausência	0,3	43500	27200	62,53	1,10E+06	Ausência	0,3
04/05/12	7	235000	144100	61,32		-	-	199700	123900	62,04		-	-
11/05/12	14	280600	170600	60,8	8,30E+04	Ausência	110	235200	140400	59,69	3,80E+03	Ausência	10
18/05/12	21	389900	227400	58,32		-	-	321900	183600	57,04		-	-
25/05/12	28	558300	276800	49,58	3,50E+04	Ausência	16	344900	179200	51,96	3,60E+03	Ausência	126

Leitos Descobertos – LD1 e LD2

Data	Tempo (d)	LD1						LD2					
		<i>Salmonella</i>						<i>Salmonella</i>					
		ST (mg/kg)	SV (mg/kg)	SV/ST (%)	CTt (NMP/gST)	sp. (P ou A/10g)	OVH (ovo/gST)	ST (mg/kg)	SV (mg/kg)	SV/ST (%)	CTt (NMP/gST)	sp. (P ou A/10g)	OVH (ovo/gST)
Repetição 1													
24/02/12	0	29100	18100	62,2	6,80E+03	Ausência	0,3	38000	23600	62,11	1,40E+05	Ausência	40
02/03/12	7	379200	206000	54,32	-	-	-	375700	211900	56,4	-	-	-
09/03/12	14	626200	316200	50,5	1,60E+08	Presença	60	628800	331900	52,78	9,20E+07	Presença	340
16/03/12	21	703600	365700	51,98	-	-	-	834300	410100	49,15	-	-	-
23/03/12	28	581000	300200	51,67	9,20E+07	Presença	12	619300	329300	53,17	5,40E+08	Presença	2,9
Repetição 2													
27/03/12	0	34400	21600	62,79	7,80E+04	Ausência	0,1	39200	24300	61,99	2,30E+03	Ausência	0
03/04/12	7	245700	146900	59,79	-	-	-	221000	136300	61,67	-	-	-
10/04/12	14	256900	155700	60,61	2,30E+04	Ausência	17	313000	182900	58,43	1,10E+04	Presença	35
17/04/12	21	391500	217800	55,63	-	-	-	459800	249000	54,15	-	-	-
24/04/12	28	347800	184900	53,16	7,00E+06	Presença	1,9	424500	208300	49,07	3,20E+07	Ausência	2
Repetição 3													
27/04/12	0	43000	26900	62,56	2,10E+06	Ausência	0,3	38900	24500	62,98	2,50E+06	Ausência	0,3
04/05/12	7	181500	111100	61,21	-	-	-	173500	107800	62,13	-	-	-
11/05/12	14	204600	127000	62,07	1,60E+04	Ausência	8,1	237800	143900	60,51	1,80E+05	Ausência	1,3
18/05/12	21	197900	121800	61,55	-	-	-	236900	144000	60,79	-	-	-
25/05/12	28	249400	146800	58,86	6,30E+04	Ausência	17	289800	167100	57,66	2,30E+03	Ausência	15

