

CAMILO TEIXEIRA

HIGIENIZAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO POR COMPOSTAGEM TERMOFÍLICA PARA USO
AGRÍCOLA

FLORIANÓPOLIS – SC
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOSSISTEMAS

CAMILO TEIXEIRA

HIGIENIZAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO POR COMPOSTAGEM TERMOFÍLICA PARA USO
AGRÍCOLA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agroecossistemas.

Orientador: Prof. Dr. Paul Richard Momsen Miller

FLORIANÓPOLIS – SC
2012

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

T266h Teixeira, Camilo
Higienização de lodo de estação de tratamento de esgoto
por compostagem termofílica para uso agrícola [dissertação] /
Camilo Teixeira ; orientador, Paul Richard Momsen Miller. -
Florianópolis, SC, 2012.
139 p.: grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-
Graduação em Agroecossistemas.

Inclui referências

1. Agricultura. 2. Agroecossistemas. 3. Compostagem
termofílica. 4. Lodo. 5. Esgotos. 6. Insumos agrícolas.
I. Miller, Paul Richard Momsen. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Agroecossistemas. III. Título.

CDU 631

Folha de Aprovação

Camilo Teixeira

HIGIENIZAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO POR COMPOSTAGEM TERMOFÍLICA PARA USO AGRÍCOLA

Dissertação aprovada em 03 de Maio de 2012, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Dr. Luiz Carlos Pinheiro Machado Filho
Coordenador do PGA

Banca Examinadora

Prof. Dr. Paul Richard Momsen Miller
Presidente da Banca – Orientador

Prof. Dr. Jucinei José Comin
Membro

Prof. Dr. Paulo Belli Filho
Membro Externo

Prof. Dr. Fernando Fernandes
Membro Externo

**Dedico este trabalho a
todos os composteiros
do Brasil e do mundo. Sigam na luta!!!**

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Natureza pela oportunidade de viver. Faço sinceros agradecimentos a inúmeras pessoas que de alguma forma contribuíram para que eu encerrasse esta etapa tão importante de minha vida e que não me lembrarei para fazer os justos agradecimentos pessoais.

Agradecimentos especiais ao meu Professor, Orientador e acima de tudo amigo Rick. Ao Professor Jucinei, ao Professor Lovato e todos os outros professores que contribuíram na minha formação.

Destaco também minha gratidão a CASAN, pela concessão da bolsa e a FAPESC pelo financiamento do Projeto. Agradeço também todos os colegas do Projeto CASAN: Francisco, Paulo Armando, Wanderli, Alexandre Trevisan, Alexandre Conceição e, em especial, ao Professor Paulo Belli Filho, pela confiança e cooperação para execução deste trabalho. Agradeço também ao Pereira (Ruri Ruri), e a todo o pessoal da compostagem, em especial aqueles que me ajudaram na coleta do lodo (sinistro!!!), destacando o Skitter e o Breno. Ao Caio ficam aqui meus sinceros agradecimentos pela amizade.

Ao pessoal do CCA, principalmente a Andréia, a Tanusa, a Raquel do RU, a todos os funcionários do RU pelo preparo do nosso alimento diário, aos funcionários da Biblioteca pela educação e profissionalismo, ao Cepagro, Associação Orgânica (Gérson e Tatu), à galera do “Feudo do Rick” (parabéns pelas iniciativas), todos os amigos da Graduação, e principalmente aos parceiros de cerveja e de futebol, que contribuíram bastante para que eu pudesse ter momentos prazerosos, que foram decisivos para continuar empenhado no trabalho. A todo o pessoal do Laboratório de Virologia ficam aqui meus profundos agradecimento, a todos os colegas de Programa e do Laboratório de Biotecnologia Neolítica que estiveram ao meu lado e me acompanharam neste trabalho. Faço destaque à Flora, à Tati, à Graci e ao Thomas.

Aos funcionários do Laboratório de Solos, Fertilizantes e Resíduos Orgânicos da UNESC e da Econsulting pelos esclarecimentos e apoio nas análises.

Impossível expressar minha gratidão à minha família (pai, mãe e irmãs), além da Lisete, que em muito me ajudou nas formatações e ponderações sobre este trabalho, e também à Nega pela paciência, confiança e companheirismo (sem contar as inúmeras correções e formatações).

Thank you Lord for what you done for me
Thank you Lord for what you do in my life
Thank you Lord for every little thing yeah yeah
Thank you Lord for you make me sing
Sing Alone Sing Alone

Bob Marley - Thank You Lord

RESUMO

O presente estudo avaliou a compostagem como método de higienização e ciclagem de nutrientes do lodo de esgoto da Estação de Tratamento de Esgoto Insular, em Florianópolis. Este foi o método escolhido devido às altas temperaturas por longos períodos resultantes da degradação da matéria orgânica. Foi feita a caracterização físico-química e biológica do lodo bruto, avaliando macro e micronutrientes, microrganismos patogênicos e elementos inorgânicos tóxicos. Foi avaliada a carga máxima de lodo de esgoto em leiras estáticas de compostagem com aeração natural, assim como a melhor mistura a ser utilizada neste processo. Também avaliou-se a contaminação microbiológica e parasitológica do lodo de esgoto bruto e do lodo de esgoto após a passagem pela compostagem. Verificou-se que o lodo de esgoto é um material com baixa contaminação por elementos inorgânicos (exceto o mercúrio) e alta contaminação por microrganismos patogênicos (principalmente coliformes termotolerantes), devendo, portanto passar com um processo de higienização para sua segura aplicação agrícola. A compostagem com cargas entre 60 e 80 kg de lodo de ETE por metro quadrado de leira, misturado com o agente estruturante, e intercalado com a aplicação de restos de alimentos, se mostrou o tratamento que alcançou as maiores temperaturas (60-70°C), sendo o mais eficiente do ponto de vista legal para eliminação de patógenos. O produto do lodo após ficar 20 dias na compostagem resultou em um material Classe B de acordo com a Resolução 375/06 do CONAMA, sendo portanto apto a ser utilizado na agricultura, embora restrito à cultura do café, a silvicultura e às culturas de fibras e óleos.

Palavras-chave: Compostagem termofílica, biossólido, lodo de esgoto e insumo agrícola.

ABSTRACT

This study seeks to evaluate composting of sewage sludge as a sanitation and nutrient cycling procedure. Raw sewage sludge was analyzed for nutrient content, pathogens and toxic elements. Various loading rates and mixtures to naturally aerated static piles were evaluated. Pathogens were evaluated before and after composting. Results show that sewage sludge from Florianópolis had low levels of toxic elements, and high pathogens contamination (principally heat-tolerant coliform), requiring sanitation measure before agricultural use. Loading between 60 and 80 kg/m² sewage sludge mixed with wood shavings, alternating layers with food waste resulted in the highest temperature (60-70°C) and the greatest reduction in pathogens. The product of this process after 20 days in composting piles result in a material within legal limits for agriculture use, but restricted to forestry, oil crops and fiber crops.

Key words: Thermophilic composting, biosolid, sewage sludge and agricultural input.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Constituição das águas residuárias.....	34
Figura 2: Simplificação do processo de compostagem.....	49
Figura 3: Fluxo de ar em leiras de compostagem com aeração natural.....	56
Figura 4: Perfil da temperatura em leiras estáticas com aeração natural.....	64
Figura 5: Classificação dos fertilizantes orgânicos conforme IN 25/09 do MAPA e dos produtos derivados de estações de tratamento conforme Resolução 375/06 do MMA.....	67
Figura 6: Corte transversal esquemático com a distribuição dos materiais para aquecimento da leira antes da incorporação do lodo bruto.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Métodos de compostagem e suas características.....	52
Tabela 2: Características químicas de agentes estruturantes.....	61
Tabela 3: Tempo de sobrevivência de patógenos em resíduos sólidos e no solo.....	63
Tabela 4: Restrições de uso para fertilizantes orgânicos.....	68
Tabela 5: Classificação de lodo de esgoto ou produto derivado de acordo com a Resolução 375/06 e as concentrações de patógenos toleradas.....	69
Tabela 6: Requisitos para classificação de lodos de esgoto ou produtos derivados conforme Resolução 375/06.....	73
Tabela 7: Limites máximos de contaminantes admitidos em Fertilizantes Orgânicos conforme IN 27/06.....	74
Tabela 8: Concentração máxima permitida de substâncias inorgânicas no lodo de esgoto ou produtos derivados conforme Resolução 375/06 e IN 27/06.....	75
Tabela 9: Metodologia para determinação das características físico-químicas do lodo da ETE Insular.....	78
Tabela 10: Composição dos tratamentos em cada experimento.....	80
Tabela 11: Características físicas e químicas do lodo de esgoto da ETE Insular.....	86
Tabela 12: Elementos inorgânicos no lodo da ETE Insular.....	89
Tabela 13: Comparação da quantidade de ovos viáveis de helmintos da ETE Insular com outras ETE's.....	104
Tabela 14: Classificação de acordo com a Resolução 375/06 e da IN 27/06, do lodo compostado, a partir dos parâmetros microbiológicos e parasitológicos.....	106

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Fronteiras planetárias.....	26
Gráfico 2: Umidade, sólidos fixos, sólidos voláteis em lodo de ETE.....	85
Gráfico 3: Nitrogênio orgânico e nitrogênio inorgânico (% da MS).....	87
Gráfico 4: Mercúrio no lodo da ETE Insular.....	90
Gráfico 5: Média de temperatura do lodo no Experimento 1 após aplicação na leira de compostagem.....	93
Gráfico 6: Média de temperatura do lodo no Experimento 2 após aplicação na leira de compostagem.....	94
Gráfico 7: Média de temperatura do lodo no Experimento 3 após aplicação na leira de compostagem.....	95
Gráfico 8: Média de temperatura do lodo no Experimento 4 após aplicação na leira de compostagem.....	96
Gráfico 9: Influência da chuva na temperatura da leira.....	98
Gráfico 10: Manutenção de temperatura no interior da leira após a aplicação do biossólido.....	99
Gráfico 11A: Coliformes termotolerantes em lodo bruto, lodo após 20 dias na compostagem, e limite máximo para classificação como “Tipo B” de acordo com a Resolução 375/06.....	101
Gráfico 11 B: Coliformes termotolerantes em lodo após 20 dias na compostagem, e limite máximo para classificação como “Tipo A” de acordo com a Resolução 375/06.....	102
Gráfico 12: Eficiência da compostagem para eliminação de cópias genômicas de adenovírus.....	105

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

$^{\circ}\text{C}$	Graus centígrados
As	Arsênio
Ca	Cálcio
CASAN	Companhia de Catarinense de Água e Saneamento
Cd	Cádmio
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental- SP
CETRES	Centro de Transbordo de Resíduos Sólidos
Cl	Cloro
Co	Cobalto
COMCAP	Companhia de Melhoramento da Capital
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTC	Capacidade de Troca de Cátion
Cu	Cobre
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
Fe	Ferro
Hg	Mercúrio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IN	Instrução Normativa
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
K	Potássio
Kg	Kilograma
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
MAPA	Ministério de Abastecimento, Pecuária e Agricultura
Mg	Magnésio
mg	Miligramas
MMA	Ministério do Meio Ambiente
Mn	Manganês
M.O.	Matéria Orgânica
MS	Matéria Seca
N	Nitrogênio
Ni	Níquel
NMP	Número Mais Provável
P	Fósforo
Pb	Chumbo
PCR	Polymerase Chain Reaction
PRAP	Processo para Redução Adicional de Patógenos
PRAV	Processo para Redução da Atratividade de Vetores

PRSP	Processo para Redução Significativa de Patógenos
RACCaF	Restos de Alimentos Cozidos e Cascas de Frutas
S	Enxofre
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
Se	Selênio
ST	Sólidos Totais
UNEP	United Nations Environmental Programme
USEPA	United States Environmental Protection Agency
WEF	World Economic Forum
UFF	Unidades Formadoras de Foco
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	25
2. OBJETIVOS.....	29
2.1. Objetivo Geral.....	29
2.2. Objetivos Específicos.....	29
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
3.1. Estações de Tratamento de Esgoto – ETE.....	31
3.2. Lodo de esgoto.....	33
3.2.1. Uso de biossólidos na Agricultura	35
3.2.1.1. Benefícios.....	36
3.2.1.1.1. Parâmetros físicos e químicos.....	36
3.2.1.1.2. Ciclagem de nutrientes	37
3.2.1.1.2.1. Nitrogênio.....	38
3.2.1.1.2.2. Fósforo.....	39
3.2.1.2. Riscos.....	41
3.2.1.2.1. Patógenos.....	41
3.2.1.2.1.1. Vírus.....	42
3.2.1.2.1.2. <i>Salmonella</i>	43
3.2.1.2.1.3. Helmintos.....	44
3.2.1.2.2. Elementos inorgânicos	44
3.2.1.2.2.1. Consequências do acúmulo de elementos inorgânicos tóxicos.....	46
3.3. Matéria orgânica: Compostagem ou aterro sanitário?.....	46
3.3.1. Compostagem.....	48
3.3.1.1. Características Gerais.....	48
3.3.1.2. Leiras estáticas com aeração natural “Método UFSC”.....	51
3.3.1.3. Controle dos fatores ecológicos na compostagem.....	54
3.3.1.3.1. Oxigenação.....	55
3.3.1.3.2. Calor	56
3.3.1.3.3. Umidade.....	57
3.3.1.3.4. Relação C/N.....	58
3.3.1.3.5. pH.....	59
3.3.1.3.6. Agente estruturante.....	60
3.3.1.3.7. Inoculante.....	62
3.3.1.4. Compostagem e patógenos.....	62
3.4. Legislação para higienização de lodo de esgoto no Brasil.....	65
3.4.1. Definição legal para lodo de esgoto e produtos derivados.....	65
3.4.2. Patógenos	68

3.4.3. Elementos inorgânicos.....	74
-----------------------------------	----

4. METODOLOGIA.....77

4.1. Caracterização do lodo da ETE Insular.....	77
4.1.1. Coleta e armazenamento das amostras.....	77
4.1.2. Metodologia das análises físicas e químicas.....	77
4.2. Experimentos para determinação de misturas e cargas para a compostagem de lodo de ETE e análises microbiológicas e parasitológicas antes e após a compostagem.....	80
4.2.1. Experimento 1 e 2 - Determinação de mistura.....	80
4.2.2. Experimento 3 e 4 - Determinação da carga máxima.....	83
4.2.3. Experimento 5 - Análise microbiológica e parasitológica em amostras de lodo de ETE e de lodo compostado.....	83
4.2.3.1. Confecção da leira.....	83
4.2.4. Experimento 6 - Detecção viral em amostras de lodo de ETE e em composto de lodo.....	84

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....85

5.1. Características físico-químicas do lodo da ETE Insular.....	85
5.1.1. Umidade, sólidos fixos, sólidos voláteis e matéria orgânica.....	85
5.1.2. Nitrogênio, pH e relação C/N.....	86
5.1.3. Macronutrientes.....	88
5.1.4. Sódio.....	88
5.2. Elementos inorgânicos no lodo da ETE Insular.....	89
5.3. Experimentos de mistura e carga de lodo de ETE em compostagem “Método UFSC”.....	92
5.3.1. Experimento 1 - Mistura incorporada ao lodo de ETE para compostagem.....	92
5.3.2. Experimento 2 - Mistura incorporada ao lodo de ETE para compostagem.....	93
5.3.3. Experimento 3 - Carga máxima de lodo de ETE em compostagem.....	95
5.3.4. Experimento 4 - Carga máxima de lodo de ETE em compostagem.....	96
5.4. Avaliação de patógenos em lodo de ETE e a eficiência de higienização pela compostagem.....	99
5.4.1. Padrão de temperatura da leira para análises de coliformes termotolerantes, <i>Salmonella</i> e ovos viáveis de helmintos.....	99
5.4.1.1. <i>Salmonella</i>	100
5.4.1.2. Coliformes termotolerantes.....	101
5.4.1.3. Helmintos.....	103

5.4.1.3.1. Comparação da quantidade de ovos viáveis de helmintos da ETE Insular com outras ETE's.....	103
5.4.2. Vírus (Adenovírus).....	104
5.4.3. Classificação do lodo compostado de acordo com a Resolução 375/06 e a IN 27/06 a partir dos parâmetros microbiológicos e parasitológicos.....	106
6. CONCLUSÕES.....	109
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	111
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
APÊNDICE.....	129
A.DIMENSIONAMENTO DE UM PÁTIO DE COMPOSTAGEM PARA HIGIENIZAÇÃO DO LODO DA ETE INSULAR.....	130

1. INTRODUÇÃO

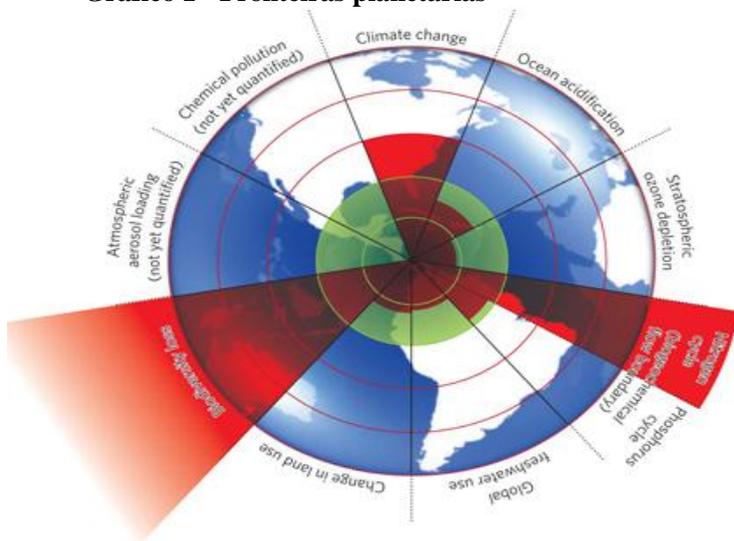
Os resíduos urbanos, e principalmente aqueles provenientes de estações de tratamento de Esgoto (ETE's), também chamado de biossólido¹, podem ser utilizados como fertilizantes orgânicos de culturas agrícolas. Entretanto devem passar por um processo de higienização para diminuir os seus impactos no ambiente. Segundo Bettiol & Camargo (2000) a maioria dos projetos de tratamento de esgoto não prevê um destino final para o lodo produzido, sendo esta uma etapa problemática dentro do processo operacional das ETE's.

Apenas uma minoria da população brasileira ter acesso ao sistema de saneamento, mas a partir de políticas governamentais, em médio prazo se terá um aumento significativo na quantidade de resíduo proveniente destas ETE's (SPERLING & ANDREOLLI, 2010). Com o aumento do volume de biossólidos, há a necessidade de pesquisas sobre a destinação final de forma segura (do ponto de vista social, ambiental, sanitário e econômico), e procurando-se a ciclagem dos nutrientes presentes neste material.

Segundo Rockström et al. (2009) a aplicação excessiva de fertilizantes minerais na agricultura, além de serem potencialmente poluidores às águas, também podem perturbar os ciclos biogeoquímicos dos sistemas terrestres. Os impactos da utilização de fontes adicionais de nutrientes e seu uso mais eficiente justificam a adoção de limites para o fluxo destes elementos, priorizando as práticas recicladoras. Em sua pesquisa, Rockstrom et al. (2009) desenvolveram um gráfico com oito fatores tidos como potencialmente poluidores, atribuindo a cada um deles valores denominados “limites planetários” (linha verde), que, quando extrapolados podem ser prejudiciais à manutenção humana na terra nas gerações subseqüentes (Figura 1). Observa-se que o ciclo do nitrogênio extrapola em muito este limite, enquanto o fósforo está muito próximo disto. Merece destaque que estes dois nutrientes estão presentes em quantidades consideráveis no biossólido, cujo manejo inadequado contribui para a extrapolação dos limites planetários.

¹ De acordo com a WEF, só é chamado de biossólido o lodo que tem uma destinação útil, ou seja, todo biossólido é lodo, mas nem todo o lodo é biossólido. Todavia como em diversos trabalhos os autores fazem uma confusão nestes conceitos. Portanto, nas referências bibliográficas utilizarei a forma original do autor.

Gráfico 1 - Fronteiras planetárias



Fonte: Rockstrom et al. (2009).

Segundo Inácio & Miller (2009) o processo de compostagem termofílica é uma forma de reutilizar o nitrogênio e o fósforo presente no bio-sólido, servindo também para higienização deste material, que pode apresentar quantidades expressivas de organismos patogênicos, uma vez que o processo alcança temperaturas acima de 55°C podendo eliminar microorganismos patogênicos. Além dos benefícios do ponto de vista sanitário, a compostagem apresenta outros benefícios quando comparado à aplicação do bio-sólido bruto, tais quais: a incorporação de uma matéria orgânica mais estável (húmus) ao solo; a diminuição do volume para aplicação e transporte do material e a adsorção de metais pesados em quelatos, tornando-os indisponíveis às plantas.

Em 2006 o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), órgão ligado ao MMA (Ministério do Meio Ambiente) elaborou a Resolução 375/06, no qual “Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitários e seus produtos derivados”, cujo objetivo é minimizar os impactos ambientais provenientes do descarte deste material, bem como reutilizar os nutrientes presentes no bio-sólido.

No caso de Florianópolis, a CASAN é a empresa responsável pela distribuição da água, bem como pela coleta, tratamento e disposição final do esgoto da cidade de Florianópolis-SC e região metropolitana. Atualmente a empresa vem procurando se adequar às novas regras em relação à destinação final dos resíduos por ela coletados e tratados, pois desde sua criação os seus dejetos eram depositados diretamente em aterros sanitários, o que pode gerar problemas ambientais tais como: produção de metano e óxido nitroso, solubilização de elementos inorgânicos, eutrofização de águas superficiais e subterrâneas, etc. Do ponto de vista econômico, a compostagem também pode ser uma alternativa para a redução dos custos para destinação final dos lodos oriundos do tratamento de esgoto (PIANA, 2009).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a eficiência da compostagem na higienização do lodo de estação de estação para uso agrícola.

2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar físico quimicamente o lodo da Estação de Tratamento de Esgoto Insular;
- Definir misturas e cargas para compostagem do lodo da ETE Insular;
- Avaliar a potencialidade de valorização do produto final para fins agrícolas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Há algumas décadas o tema da reutilização dos lodos de esgoto vem sendo abordado em diversas pesquisas pelo mundo. No Brasil, percebe-se que na última década houve uma ampliação relevante nas pesquisas buscando alternativas de disposição final do lodo de esgoto.

3.1. Estações de Tratamento de Esgoto - ETE

Estações de Tratamento de Esgoto são unidades operacionais dos sistemas de esgotamento sanitário que através de processos físicos, químicos ou biológicos removem as cargas poluentes do esgoto, devolvendo ao ambiente o produto final, efluente tratado, em conformidade com os padrões exigidos pela legislação ambiental (CASAN, 2005). As estações de Tratamento de Esgoto podem adotar diversos processos para o tratamento do esgoto sanitário e das águas residuárias como os filtros biológicos, as lagoas de estabilização e os lodos ativados. O processo dos lodos ativados com aeração prolongada foi o escolhido para tratar o esgoto sanitário da área central de Florianópolis na ETE Insular.

Este processo de tratamento é utilizado mundialmente para o tratamento de despejos domésticos e industriais, sendo muito utilizado em locais em que haja áreas reduzidas para o tratamento do esgoto (SPERLING, 1997). Apresenta como principais desvantagens o alto custo e a necessidade de controle laboratorial diário.

De forma geral é um processo biológico onde o esgoto afluente, na presença de oxigênio dissolvido, agitação mecânica e pelo crescimento e atuação de microorganismos específicos, forma flocos denominados lodo ativado ou lodo biológico. Esta fase do tratamento objetiva a remoção da matéria orgânica biodegradável presente no esgoto. Após esta etapa, a fase sólida é separada da líquida em outra unidade operacional, denominada decantador. O lodo ativado separado retorna ao processo ou é retirado para tratamento específico ou destino final (CASAN, 2005).

Este processo para o tratamento de esgotos apresenta duas fases distintas: a fase do pré-tratamento (gradeamento e desarenação) e a fase do tratamento secundário (seletor biológico, câmara de desnitrificação, tanques de aeração, decantador secundário, adensador, sistema de desidratação e prensa desaguadora) (SPERLING, 1997; CASAN, 2005).

A fase pré-tratamento consiste na retirada mecânica de partículas com alta granulometria, enquanto as etapas biológicas deste sistema de tratamento ocorrem nas seguintes unidades: reator biológico, câmara de desnitrificação e tanque de aeração (reator). O reator biológico tem como função misturar suavemente o esgoto bruto afluente com o lodo ativado proveniente do processo de tratamento de aeração prolongada, evitando microorganismos indesejáveis e melhorando a sedimentação, e ocorre em condição anóxica. Do seletor biológico a mistura passa pela câmara de desnitrificação, que, através de misturadores submersíveis tem a função de reduzir o nitrato sob a ação de microorganismos específicos. Já no tanque de aeração, a partir da ação das bactérias aeróbias ocorrerá a digestão da matéria orgânica carbonácea e a nitrificação do nitrogênio orgânico remanescente do afluente bruto. (CASAN, 2005). As bactérias envolvidas neste processo formam uma matriz gelatinosa que lhes confere a propriedade de flocular. O floco formado possui dimensões maiores, facilitando o processo de remoção de patógenos (SPERLING, 1997).

No decantador secundário os flocos formados no tanque de aeração se sedimentam, removendo o lodo para a recirculação (proporcionando um aumento da população bacteriana e conseqüentemente otimizando o processo) ou descarte do excesso. Este excesso é conduzido até um adensador gravimétrico com removedor mecânico, cuja função é reduzir os teores de água no lodo sedimentado. Posteriormente este lodo passa por um sistema de desidratação composto por: tanque de armazenamento com removedor mecânico, sistema de recalque, sistema de pré-condicionamento químico com suspensão de cal e da solução de polieletrólitos. Por fim, este material chega à prensa desaguadora que produz uma “torta” com teores de sólidos próximos a 20%. Esta torta é levada até o local de estocagem para posterior disposição final, que no caso da ETE Insular é o aterro sanitário (CASAN, 2005).

Merece destaque que no processo de lodo ativado a redução de vírus entéricos ocorre principalmente por adsorção viral aos sólidos ou por inativação viral. A distribuição viral entre as fases sólidas e líquidas depende da distância destas em relação aos sólidos em suspensos e da capacidade adsorativa (ARRAJ et al, 2005).

3.2. Lodo de esgoto

Os processos de tratamento de esgoto contribuem para evitar a contaminação dos recursos hídricos e do solo. Seu produto final, o lodo de esgoto, é um produto rico em matéria orgânica e nutrientes (BETTIOL & CAMARGO, 2006a), e pode ser utilizado de forma benéfica na agricultura, proporcionando a ciclagem dos nutrientes. Todavia, para a aplicação agrícola segura deste material é indispensável que o mesmo não apresente teores de metais pesados e patógenos acima do determinado pela legislação (EPSTEIN, 2002).

Além de seu potencial poluidor e transmissor de doenças, o gerenciamento do biossólido representa custos elevados aos sistemas urbanos de tratamento (INÁCIO & MILLER, 2009), que podem chegar a até 60% dos custos de uma ETE (SPERLING & ANDREOLLI, 2010).

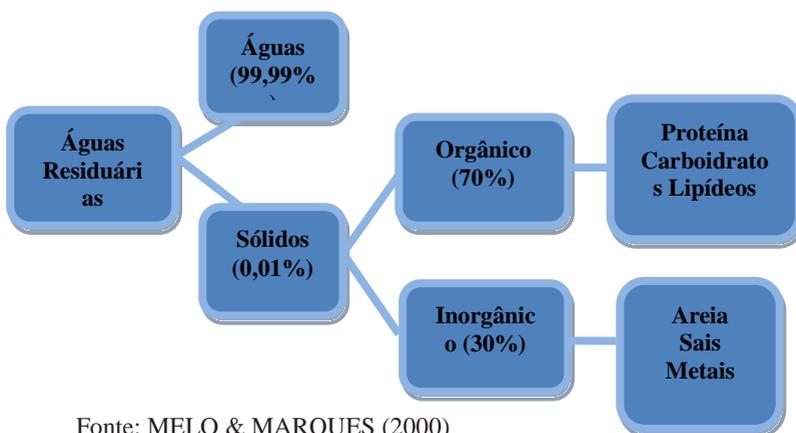
Existem duas origens básicas para o lodo de ETE, são elas: esgotos sanitários e esgotos industriais. No primeiro, estão basicamente os efluentes residenciais, com a possibilidade de, em diversos locais serem contaminados por ligações irregulares que podem destinar materiais contaminados para as ETE's. Na segunda, estão os lodos industriais, que podem apresentar quantidades significativas de metais pesados, tornando o material não seguro para a aplicação agrícola, de acordo com o tipo de indústria despejante (BETTIOL & CAMARGO 2006b).

De acordo com dados do IBGE (2008), no Brasil, apenas 55,2% dos municípios possuem coleta de esgoto, sendo este valor referente exclusivamente à coleta, e não ao tratamento. Na região Sul, aproximadamente 6,3 milhões de pessoas não tem acesso à rede coletora de esgoto e Santa Catarina ocupa a 16ª posição em relação à porcentagem de domicílios atendidos pela rede de esgoto.

Em Florianópolis, de acordo com a Prefeitura Municipal, 56% da população não têm acesso ao sistema de saneamento, de forma que os resíduos produzidos por esta parcela da população invariavelmente alcançam os recursos hídricos. Isto pode prejudicar enormemente algumas atividades, como a maricultura, a pesca, o turismo, além de colocar em risco a saúde da população e do meio ambiente (SCHLINDWEIN, 2006). Desta forma mostra-se indispensável que o sistema de coleta e tratamento de esgoto seja aprimorado, tendo o seu produto final (o lodo de esgoto) uma destinação final adequada.

Antes de passar pela Estação de tratamento de esgoto (ETE), o esgoto é constituído por 99,99% de água, e apenas 0,01% de sólidos, sendo a principal função da ETE separar estas duas fases (GONÇALVES et al., 2010). Esta separação, normalmente é realizada por processos de floculação ou decantação (METCALF & EDDY, 2003), destinando a parte líquida aos corpos hídricos e processando a fase sólida, permitindo sua utilização (GONÇALVES et al., 2010). Deve-se ressaltar, entretanto que é justamente na parte sólida que está concentrada a maior parte dos poluentes.

Figura 1 - Constituição das águas residuárias



Fonte: MELO & MARQUES (2000)

Os processos básicos no tratamento da parte sólida são: estabilização, secagem e higienização. A estabilização é o processo no qual se busca a redução dos sólidos voláteis, diminuindo o potencial de produção de odores, e conseqüentemente a atratividade para animais e vetores de doenças. Além disto, a estabilização também pode acarretar a eliminação de parte dos patógenos presentes no biossólido. São exemplos de formas de estabilização: a digestão aeróbia, a digestão anaeróbia e a compostagem. O processo de secagem visa eliminar o excesso de umidade do material, o qual pode inviabilizar sua valorização benéfica e aumenta os custos de transporte, e pode ser feito por desaguamento, desidratação ou adensamento. Por fim, a higienização busca a eliminação de patógenos até valores que não sejam

prejudiciais ao homem e a natureza, possibilitando a sua segura utilização. A caleação, a compostagem e/ou a secagem térmica são as principais formas atuais de higienização de bio-sólido (ANDREOLLI et al., 2010).

O termo bio-sólido foi criado e divulgado em todo o mundo para valorizar e incentivar o uso de lodo de esgoto e de seus derivados, sobretudo na agricultura. Para ser considerado um bio-sólido, este material deve receber algum tipo de higienização e apresentar características apropriadas para sua utilização agrícola (LIMA, 2010).

Segundo Tsutiyu (2000), o uso agrícola, a disposição em aterros sanitários, o reuso industrial (produção de agregados leves, fabricação de tijolo e cerâmica e produção de cimento), a incineração, a conversão do lodo em óleo combustível e a recuperação de áreas degradadas, o “*Landfarming*”, são alternativas possíveis para o aproveitamento e/ou destino final do bio-sólido.

O bio-sólido vem sendo estudado como fonte de fósforo, nitrogênio e outros elementos benéficos na agricultura, sendo uma alternativa de disposição de baixo custo (BETTIOL & CAMARGO, 2006b). Segundo a SANEPAR (1997) as propriedades do bio-sólido são semelhantes às de outros produtos orgânicos utilizados na agricultura.

O lodo apresenta pH normalmente na faixa de 6,0 a 7,0; teores de carbono próximos a 30% (base seca); altos teores de N,P e S; baixas quantidades de K, e concentrações significativas de Ca e Mg (TEDESCO et al., 2008). Além dos macronutrientes, o lodo apresenta alta quantidade de micronutrientes (CHENG et al., 2007).

Em síntese, o lodo bruto é um subproduto do tratamento de esgoto, podendo ser utilizado como um insumo agrícola de grande potencial, principalmente em locais em que tenha ocorrido uso intensivo do solo. Todavia, como ao passar pelo processo de tratamento, os possíveis metais pesados e patógenos presentes no esgoto se concentram no bio-sólido, seu uso deve ser monitorado de forma a evitar a contaminação solo, das águas, dos animais e do homem (GOMES et al., 2001; SPERLING & ANDREOLLI, 2010; SILVA et al., 2008).

3.2.1. Uso de bio-sólidos na Agricultura

De forma geral, os solos brasileiros são ácidos, com baixa fertilidade natural e com intensa exploração agrícola. Neste sentido vem-se procurando novas práticas que contribuam para a melhoria das

características do solo, permitindo assim a recuperação destes solos (SOARES, 2005). O bio sólido, desde que devidamente higienizado e com baixas concentrações de metais pesados, pode exercer este papel. São varias as possibilidades de utilização agrícola do bio sólido, como a silvicultura, a floricultura, o paisagismo, a produção de alimentos (respeitando as imposições legais), entre outros (EPSTEIN, 2002).

3.2.1.1. Benefícios

A reciclagem do bio sólido para sua futura utilização agrônômica é, segundo Vaz & Gonçalves (2002), a forma mais adequada para a ciclagem dos seus nutrientes, contribuindo para a diminuição dos problemas ambientais e atuando como fertilizante e condicionador do solo. Estes benefícios são em grande parte devido às grandes quantidades de matéria orgânica no bio sólido (EPSTEIN, 2002).

No solo, a Matéria Orgânica (MO) é constituída pelos resíduos vegetais em diversos estágios de decomposição, pela biomassa microbiana, as raízes e o húmus, que em conjunto afetam as características químicas e físicas do solo (BAYER & MIELNICKZUK, 2008). Segundo Reeves (1997), a matéria orgânica é um dos principais “indicadores chave” para a qualidade de um solo, uma vez que a maioria dos atributos do solo tem estreita relação com ela. Além disto, a parte ativa da M.O pode imobilizar temporariamente N, P, K, Ca, Mg, S e micronutrientes, que são liberados após sua morte e decomposição, podendo tornar-se disponível às plantas. Portanto, esta biomassa microbiana representa considerável reservatório de nutrientes nos solos (GAMA-RODRIGUES & GAMA RODRIGUES, 2008).

3.2.1.1.1. Parâmetros físicos e químicos

Dentre os principais benefícios da aplicação do bio sólido no solo destacam-se aqueles verificados nos parâmetros químicos, como: incorporação e aumento da disponibilidade dos macronutrientes e micronutrientes, redução da velocidade de liberação do nitrogênio, aumento da Capacidade de Troca de Cátions (CTC); complexação de elementos tóxicos, entre outros.

Como o nitrogênio é um elemento muito instável e com baixa disponibilidade, talvez seja o mais importante nutriente a ser incorporado ao solo através do bio sólido, sendo que sua escassez pode

ser limitante à produção de biomassa de diversas culturas e solos (AMADO et al., 2002). Entretanto, mesmo que se encontrem quantidades elevadas de N no bio sólido, grande parte encontra-se sob formas orgânicas, sendo necessária sua mineralização para formas inorgânicas, principalmente amônio (NH_4) e nitrato (NO_3), para que as plantas possam absorvê-lo (CANTARELLA et al., 2008).

O lodo bruto também pode ser uma ótima fonte de fósforo para a agricultura, uma vez que apresenta quantidades significativas do nutriente. Em relação ao potássio (considerado junto com o nitrogênio e o fósforo como os nutrientes mais exigidos para as culturas) o bio sólido não se apresenta como boa fonte, pois, devido a sua alta solubilização, o elemento se perde junto à parte líquida durante o processo de tratamento na ETE (GIACOMINI et al., 2003).

Portanto, o lodo, quando aplicado como única fonte de N para as plantas, de maneira geral, terá um eficiente suprimento quantitativo dos outros elementos (exceto potássio) para suprir a demanda dos vegetais. Todavia, os nutrientes podem não estar balanceados, podendo ser necessárias fontes de adubação adicional (EPSTEIN, 2002).

Destacam-se também os benefícios da aplicação do lodo nas características físicas do solo, como: a estabilidade dos agregados e da estrutura, infiltração e retenção de água, resistência à erosão, incremento da atividade biológica, diminuição da lixiviação de nutrientes, e a melhoria da aeração. Além disso, a matéria orgânica contida nos bio sólidos pode aumentar o conteúdo de húmus do solo (BETTIOL & CAMARGO, 2000; MELLO & MARQUES, 2000; WRIGHT, 2001; CHENG ET AL 2007; PARKINSON et al., 2004).

3.2.1.1.2. Ciclagem de nutrientes

Os solos que são submetidos ao uso agrícola, baseado em práticas convencionais de manejo, apresentam um declínio no estoque de matéria orgânica, que pode chegar inclusive a 50% em um ano (MIELNICZUK, 2008). Portanto, o conhecimento da dinâmica da matéria orgânica presente ou adicionada no solo desempenha um papel chave para inferir sobre a qualidade do mesmo.

Com aumento dos preços de comercialização dos adubos minerais, os resíduos orgânicos produzidos pela indústria, pela cidade ou pelo meio rural, como esterco, vinhaça, lixo urbano, bio sólido, etc. passaram a ter decisiva importância na melhoria das condições do solo e

aumento do nível de fertilidade do mesmo (TEDESCO et al., 2008), devido ao retorno ao solo dos nutrientes exportados pelas culturas e as altas quantidades de matéria orgânica nos mesmos.

O uso destes resíduos orgânicos, em geral, traz benefícios em função da ciclagem e aumento da biodisponibilidade de alguns nutrientes de plantas. A reciclagem agrícola transforma o lodo (material atualmente descartado) em um insumo agrícola, contribuindo para “fechar” o ciclo dos nutrientes retirados do solo pela agricultura, sendo uma das ferramentas para a implantação sustentável da produção agrícola (EPSTEIN, 2002).

Portanto, a utilização de resíduos orgânicos de origem urbana ou rural traz benefícios em função da ciclagem e aumento da biodisponibilidade de alguns nutrientes das plantas. Soma-se a isto a diminuição, ao longo dos anos, da necessidade de aplicação de adubos minerais. Esta substituição dos insumos agrícolas pode gerar a redução no consumo de matéria prima utilizada na fabricação de fertilizantes minerais, a diminuição dos custos de produção, a poluição de diversos recursos naturais, possibilitando melhorias na qualidade ambiental (SILVA et al., 2008).

3.2.1.1.2.1. Nitrogênio

O nitrogênio é um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento vegetal e para os seres vivos do solo; sendo no caso dos vegetais, primordial na estrutura das proteínas, ácidos nucléicos e clorofila. Segundo Dobermann (2005), apenas a metade do N aplicado no solo é absorvido pelas plantas. Portanto a aplicação do lodo deve visar a sua eficiente utilização, com um mínimo de perdas por percolação, arraste superficial, desnitrificação e volatilização (CHENG et al., 2007), esta última, podendo contribuir para o aquecimento global e/ou provocar chuva ácida (CORREA et al., 2005; GROOFMANN, 2005).

Segundo a pesquisa de Rockstrom et al. (2009), o ciclo do nitrogênio já ultrapassou em muito o seu “limite planetário”, uma vez que, para suprir a demanda por comida, a humanidade removeu grandes quantidades de nitrogênio atmosférico para os campos, rios e florestas, devastando o ecossistema (ELSER & BENETT, 2011), o que pode acarretar problemas severos na continuidade de disponibilidade deste nutriente.

A produção de fertilizantes nitrogenados sintéticos, como a uréia, é um dos maiores responsáveis pelo acúmulo de óxido nítrico (N_2O) na atmosfera, sendo este gás o que apresenta o maior potencial de destruição da camada de ozônio² no século XXI (RAVISHANKARA et al., 2009). Diversos países assinaram o Acordo de Montreal, no qual se comprometem a definir estratégias para minimizar a produção deste. Neste sentido Smith (2007), afirmam que reduzir a utilização de fertilizantes químicos na agricultura, bem como aprimorar o manejo das terras cultiváveis são estratégias para minimizar a produção deste gás, que por ser muito estável, se mantém por longos períodos na atmosfera, afetando a camada de ozônio.

3.2.1.1.2.2. Fósforo

O fósforo é, segundo muitos autores, o segundo elemento mais importante no crescimento e desenvolvimento das plantas, estando relacionado à estrutura celular, assim como às fontes de energia (CHENG et al., 2007) e esta presente em quantidades consideráveis no biossólido (LIMA, 2010).

Entretanto, ao fazermos uma abordagem ampla, o fósforo aparece como um dos principais poluentes globais, sendo que segundo Rockstrom et al. (2009), o seu ciclo já se encontra muito próximo dos “limites planetários”. Historicamente, a partir da metade do Século XX a humanidade quadruplicou a extração de fósforo do ambiente natural (FALKOWSKI, 2000). A utilização destas reservas geológicas de fósforo criou um caminho de mão única das rochas para os campos, os lagos e os oceanos, prejudicando os reservatórios de água potável e os ecossistemas marinhos, uma vez que apenas 20% do fósforo aplicado como fertilizante chega ao prato do consumidor. Sete milhões de toneladas são jogadas no ambiente, principalmente para as águas superficiais e subsuperficiais. O excesso de fósforo (e do nitrogênio) na água gera condições propícias para a multiplicação de algas, o que diminui os índices de oxigênio na água, e consequentemente produz regiões denominadas de “zona morta” (ELSER & BENNETT, 2011; CORDELL et al., 2009).

Apesar destes possíveis problemas ambientais, existe uma grande demanda de fósforo na agricultura (RAIJ, 2011), uma vez que

² Responsável por filtrar a entrada dos raios ultra violetas emitidos pelo sol

aproximadamente 36% dos solos tropicais e subtropicais são deficientes em fósforo e mais de 24% são altamente deficientes em fósforo disponível (SANCHEZ & LOGAN, 1992 apud SANTOS et al., 2008). Soma-se a este fato a intensa exploração agrícola destas áreas (SANTOS et al., 2008), que resultam em perdas de fósforo do solo pela exportação das culturas agrícola (VANDERMEER, 1995).

Importante ressaltar também que a aplicação de fósforo a partir de materiais ricos em matéria orgânica é muito útil, uma vez que a decomposição da matéria orgânica proporciona a liberação gradual deste elemento, regulando a disponibilidade aos vegetais, e mantendo, principalmente a médio e longo prazo, os níveis das formas lábeis que tendem ao esgotamento, pelos processos de perdas por precipitação, adsorção e erosão e pela remoção dos produtos agrícolas colhidos (SANTOS et al., 2008).

Nos produtos agrícolas vegetais, a concentração de fósforo pode chegar a 0,5% da matéria seca (BEATON et al., 1995), o que representa mais de 60% do fósforo absorvido pelas plantas. Desta forma grandes quantidades de fósforo migram para as áreas urbanas, tendo como destino final, em muitos casos os mananciais e ou sistemas de coleta de esgoto (RHEINHEIMER et al., 2008) não retornando ao sistema agrícola, e conseqüentemente tendo que ser captado em reservas naturais para a manutenção da produtividade agrícola.

A importância relacionada à ciclagem deste nutriente fica evidente quando observamos que, diferentemente do nitrogênio, o fósforo não pode ser retirado do ar. Soma-se a isto o fato de que as fontes naturais não estão uniformemente distribuídas pelo globo (85% das reservas de fósforo estão no Marrocos) e são finitas. A previsão de esgotamento das mesmas é o fim deste século (MONTAG et al., 2007), panorama que exige que a comunidade acadêmica discuta o assunto para encontrar soluções técnicas e políticas para este problema (ELSER & BENNETT, 2011).

Portanto, ao utilizarmos o bioossólido estamos reintroduzindo o fósforo na cadeia produtiva vegetal, maximizando a entrada de fósforo e minimizando a adição de fertilizantes. Contribuindo desta forma para o prolongamento da vida útil de suas jazidas, e contribuindo para uma agricultura produtiva e menos danosa ao ambiente natural.

3.2.1.2. Riscos

A composição dos lodos de ETE pode inviabilizar sua utilização agrícola devido às concentrações prejudiciais de metais pesados, patógenos, compostos tóxicos ou ainda pelo risco de salinização ou acidificação do solo (BOEIRA & MAXIMILIANO, 2006).

Desta forma, deve-se remover os elementos inorgânicos tóxicos (ou ainda impedir que entrem nos sistemas de coletas de esgoto domiciliar), e os microorganismos patogênicos devem ser eliminados ou reduzidos a um nível seguro.

Em relação aos elementos inorgânicos tóxicos, as formas de remoção ainda não são economicamente viáveis, sendo que a origem do material é que definirá a viabilidade de sua utilização agrícola. Em relação à contaminação por patógenos, resultado da sanidade da população produtora do lodo, a utilização da compostagem termofílica é tida, inclusive pela United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2003), como uma forma eficiente de higienização do lodo de ETE, podendo torná-lo sanitariamente seguro para sua utilização agrícola. Cabe destacar que higienizar não é a mesma coisa que desinfetar, sendo que, após a higienização, concentrações de patógenos aceitas pela legislação, ainda podem ser encontradas (PINTO, 2010).

3.2.1.2.1. Patógenos

Atualmente, diversos organismos patogênicos vêm sendo identificados e reconhecidos como causa principal de várias doenças. Muitos destes são transmitidos pelas fezes, o que faz com que os mesmos possam estar presentes no lodo de esgoto (DUMONTET et al., 2001; SHIDU & TOZE, 2009), podendo ocasionar surtos de doenças gastrointestinais, respiratórias, hepatites, dermatoses, entre outras quando descartados de forma incorreta no ambiente.

Entre os patógenos presentes destacam-se o grupo das bactérias, protozoários, vírus e helmintos (MAIER et al., 2009; USEPA, 2003). Além destes, os ovos de parasitas também podem ser facilmente encontrados em diversos tipos de lodo (SMITH et al., 2004; USEPA, 2003).

A diversidade de microorganismos presentes em lodo de estação de tratamento é influenciada diretamente pela população e/ou do tipo de indústria que o produz, ou seja, é consequência das condições sócio-

econômicas da população geradora, condição sanitária, região geográfica, presença de indústrias agro-alimentares e o tipo de tratamento a que o lodo foi submetido (SILVA et al., 2010).

A contaminação através do lodo pode ocorrer de forma direta através do contato com o solo ou produto onde foi aplicado o biossólido ou indireta, pelo consumo de água ou alimento contaminado (USEPA, 2003).

A presença de matéria sólida, especialmente os sólidos em suspensão de águas residuárias, é fator determinante para a sobrevivência de patógenos neste ambiente. É por este motivo que os microorganismos estão muito concentrados e podem sobreviver longos períodos em biossólidos (SHIZU & TOZE, 2009). Entretanto, ao se aplicar este material no solo, as condições do próprio solo, assim como o clima se tornam determinantes para a sobrevivência destes organismos.

Além da matéria orgânica, diversos são os fatores que determinam o tempo de sobrevivência de patógenos, sendo que os mais citados são: umidade, pH, temperatura, competição entre espécies, entre outros (PIETRONAVE et al., 2004; USEPA, 2003).

É importante destacar também que os vírus entéricos, os protozoários e os parasitas são incapazes de se multiplicarem no lodo, uma vez que são parasitas obrigatórios. Já as bactérias devem receber uma atenção especial, pois apresentam alta capacidade de se multiplicarem neste material. (SHIDU et al., 2001), desde que o pH não seja superior a 11,5 (GERBA E SMITH, 2005).

3.2.1.2.1.1. Vírus

Os vírus são os microorganismos patogênicos mais excretados por homens e animais, podendo apresentar cargas virais de 10^{11} partículas por grama de fezes (BOSCH et al., 2008) e, estão presentes, em altas concentrações, no produto final das estações de tratamento, pois os métodos correntes de tratamento de esgoto muitas vezes não são eficientes para sua eliminação (KOOPMANS et al., 2002), o que pode acarretar surtos de doenças em indivíduos susceptíveis caso este material seja aplicado na agricultura (ANDREOLLI et al., 2010).

Estima-se que mais de 150 diferentes tipos de vírus são excretados pelo homem, podendo ser encaminhados para o lodo

(BOSCH et al., 2008). Segundo Gerba & Smith (2005), os vírus são considerados a maior causa de infecção gastrointestinal em seres humanos em países desenvolvidos.

Por estes motivos, a agência de proteção ambiental americana (EPA) considera os vírus entéricos como modelo para o monitoramento ambiental (PUIG, 1994; YEH et al., 2009), uma vez que as doses infectantes são muito baixas (BOSCH et al., 2008) e os mesmos são muito mais resistentes que as bactérias, ao processo comum de tratamento de esgoto (GABUTTI et al., 2000).

Entre os vírus, destacam-se, devido à alta incidência em diversos ambientes, aqueles com RNA fita simples, como os calicivírus, os enterovírus, os vírus da hepatite A e da hepatite E; os rotavírus; e os vírus de DNA fita dupla como os adenovírus (LEES, 2000).

Os vírus entéricos agregam-se às fontes sólidas, diminuindo assim a possibilidade de sua inativação e favorecendo, portanto, sua viabilidade, podendo desta forma permanecer potencialmente infectantes durante meses em ambientes como a água e/ou o lodo de esgoto (TRABELSI et al., 1995; SKRABER et al., 2004). Os principais processos de inativação dos enterovírus são a variação de pH, de temperatura e de umidade (MAIER et al., 2009). O tratamento térmico é considerado o mais eficiente (SCHWARTZBORD, 1995).

Dentre os enterovírus, a família dos adenovírus se destaca devido a sua alta resistência, conseqüência de sua fita dupla de DNA. Estes são usualmente transmitidos através da via fecal-oral e replicam-se no trato gastrointestinal do hospedeiro (LIPP et al., 2001).

3.2.1.2.1.2. *Salmonella*

Segundo Sahlstrom (2003), diversos autores detectaram a presença de *Salmonella* em lodo de esgoto, sendo inclusive a bactéria que ocorre em maior número, com quase 2000 tipos identificados. Destes, grande parte é considerado patogênico ao homem (BITTON, 2005). Ainda segundo Sahlstrom (2003), 50% das amostras de lodo de uma estação de tratamento na Suécia apresentaram contaminação por *Salmonella*. Este autor cita ainda outro trabalho realizado na Noruega no qual em 10% das amostras havia contaminação por *Salmonella*.

3.2.1.2.1.3. Helmintos

Dentre os helmintos, o gênero *Ascaris* é o mais conhecido (HOGLUND, 2001). Também se destacam o *Ascaris lumbricoides*, associados a problemas gastrointestinais e a *Taenia solium*, que ocorre em alta incidência na América latina (SILVA et al., 2010).

Devido à alta velocidade de sedimentação, acredita-se que a maior parte dos ovos de helmintos fique retida no lodo (NELSON, 2003), e possam permanecer vários anos no solo que recebeu adubação com lodo de ETE, principalmente se esta região for utilizada como pasto (LIMA, 2010). Segundo Brewster et al. (2003), ovos de *Ascaris* são resistentes às condições ambientais e podem permanecer infectivos por vários anos. Por estes motivos os ovos de helmintos são ótimos indicadores para a análise das condições sanitárias (GASPARD & SCHWARTZBROD, 2001).

Conforme indicado por Aitken et al. (2005) a melhor opção para a inativação de ovos de helmintos é submetê-lo ao tratamento térmico.

3.2.1.2.2. Elementos inorgânicos

Os elementos inorgânicos são encontrados naturalmente nos solos, sendo inclusive importantes para diversos processos fisiológicos vegetais. Todavia, em lodos de esgoto, estes mesmos metais podem ter a sua concentração exacerbada, e, quando aplicados ao solo podem ser tóxicos às plantas e aos seres humanos que consumirem estes vegetais (MELO, 2002). Podem estar presentes no lodo, principalmente em lodos industriais, o cádmio e o chumbo, que são extremamente tóxicos, mesmo em baixas quantidades (SILVA et al., 2010).

De forma geral, segundo Epstein (2002), as comunidades não industrializadas apresentam concentrações baixas de elementos inorgânicos em seus lodos de esgoto, fato este confirmado por Barton et al. (2008) citado por Inácio & Miller (2009). Todavia estes autores destacam que quando despejos industriais e a água da chuva entram no sistema de captação do esgoto urbano pode ocorrer o aumento significativo das concentrações de elementos inorgânicos no lodo. No caso do Brasil, mesmo sendo ilegal, existem diversas indústrias que despejam resíduos contaminados com elementos inorgânicos nas redes de esgoto. Isto pode acarretar altas quantidades dos mesmos no lodo, mesmo quando a coleta é predominantemente domiciliar (KUCCHAR et

al., 2006).

A preocupação em relação aos elementos inorgânicos está associada tanto a sua absorção e acúmulo nos tecidos vegetais, e possivelmente na cadeia alimentar; como aos processos de sua perda por lixiviação ou erosão (SILVA et al., 2006). Todavia, o maior problema relacionado aos elementos inorgânicos no lodo é que os mesmos não podem ser destruídos, pois não são moléculas, mas sim, elementos estáveis.

O risco associado aos elementos inorgânicos do lodo está principalmente ligado ao fato do solo ser capaz de armazenar estes metais. Todavia, sua dinâmica ainda é um assunto com muitas dúvidas, sendo esta dinâmica consequência da Capacidade de Troca de Cátions, do conteúdo original, da textura, da matéria orgânica, do tipo de argila, da intensidade do intemperismo, do pH, do conteúdo de óxidos, das reações de complexação, entre outros (BORGES & COUTINHO, 2004). Dependendo das condições ambientais, os elementos inorgânicos podem estar no solo de formas disponíveis às plantas, sendo que a transferência destes metais para a cadeia alimentar dependerá das características de cada solo e do tipo de planta, visto que as espécies vegetais têm capacidades variáveis de absorção de metais (BORGES & COUTINHO, 2004).

Quando os elementos inorgânicos são aplicados no solo existem algumas rotas possíveis para os mesmos, são elas: adsorção pelas plantas, pelas argilas, precipitação, formação de quelatos com a matéria orgânica, formação de complexos insolúveis de fósforo e solubilização (EPSTEIN, 1997). Estas rotas são também influenciadas pelos fatores acima descritos.

Cabe destacar que o principal fator para a solubilização dos elementos inorgânicos no solo não é a sua quantidade absoluta, mas o pH do solo (OLIVEIRA et al., 2002). Em solos ácidos ocorre a solubilização dos metais, ficando disponíveis às plantas, e muitos dos elementos inorgânicos não são solúveis quando o pH é maior que 4,5 (EPSTEIN, 1997). Além disto, à medida que o tempo de contato com o solo aumenta, diminui o perigo das plantas absorverem os metais (BROWN et al., 1998, ABREU et al., 2002).

Desta forma, os critérios para aplicação de biossólido devem ser baseados também nos atributos do solo e não apenas nos teores totais de metais no biossólido. O conhecimento de como esses atributos influencia o comportamento dos metais torna-se, então, fundamental

para o estabelecimento da carga máxima de resíduo que um solo pode receber.

3.2.1.2.2.1. Consequências do acúmulo de elementos inorgânicos tóxicos

Do ponto de vista ambiental, MCBRIDE (1998) indica que entre os elementos que podem causar toxicidade, os mais potencialmente tóxicos as plantas e aos animais superiores são: As, Hg, Cd, Pb, Se, Co, Cu, Fe e Mn, Mo, Zn e Ni. Sendo os cinco primeiros particularmente tóxicos aos animais superiores, enquanto que os demais podem ser tóxicos as plantas, de maneira especial quando em altas concentrações, neste caso chamados de fitotóxicos.

Todavia, os prejuízos causados pela presença de elementos inorgânicos no ambiente ainda é objeto de diversos estudos. Vilar (2003) destaca alguns perigos: acúmulo na cadeia trófica, devido à assimilação por plantas que serão consumidas por homens ou animais para o abate; a fitotoxicidade, que pode prejudicar a produtividade agrícola; a alteração da microbiota do solo, que pode afetar a assimilação de nutrientes pelas plantas; a contaminação das águas superficiais devido ao arraste destes elementos pelas águas pluviais. Em relação às águas subsuperficiais, Ahlberg et al. (2006), afirma que dificilmente os metais presentes no lodo se deslocam para as camadas mais profundas do solo, portanto, o risco de lixiviação e contaminação do lençol freático se torna quase nula. Isto ocorre devido à complexação dos metais com a matéria orgânica.

3.3. Matéria orgânica: Compostagem ou aterro sanitário?

O termo aterro sanitário se refere a uma instalação previamente planejada para a posterior disposição de resíduos sólidos, visando não causar danos, nem perigo, ao meio ambiente e a saúde pública (MUÑOZ, 2002).

A decomposição anaeróbica da matéria orgânica, ou seja, aquela que ocorre sob condições marcadas pela ausência de oxigênio, é uma importante fonte de metano para o ar (BAIRD, 2002). Os aterros são responsáveis por 10 a 20% das emissões de metano geradas pela atividade antropogênica (IPCC, 2007) sendo estas emissões responsáveis para um grande número de problemas ambientais.

Segundo o Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (Brasil, 2002), elaborado pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), ligada à Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo (2006), as emissões totais de metano provenientes do tratamento de resíduos totalizaram 803.000 toneladas em 1994 e destes a maior parcela (pouco mais de 84%) foi atribuída às emissões provenientes dos aterros (DIAS, 2009).

Para o IPCC, o metano (CH₄) é um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa, e possui uma ação 25 vezes maior do que o dióxido de carbono (CO₂) em relação à retenção do calor responsável pelo aquecimento global. (IPCC, 2007).

Neste contexto, “gases de efeito estufa e seus efeitos no meio ambiente terrestre têm levado a comunidade científica na direção de se aprimorar sobre o que é e o que não é ambientalmente favorável” (BOTSKINS & KELLER, 1998), sendo os aterros sanitários um dos focos de contestação.

Atualmente diversos estudos apontam que a possibilidade de que os aterros sanitários tenham capacidade de capturar carbono para venda no mercado vem sendo contestada. De acordo com Anderson (2006) os modelos utilizados pela EPA para calcular esta captura são errôneos, tendendo a superestimá-los. O valor real capturado chega próximo a 25% do calculado por estes métodos.

A partir deste e de outros estudos, a UNEP (2011) - *United Nation Environment Programme* - afirma que uma das principais ações que devem ser incentivadas no mundo é a separação dos resíduos urbanos biodegradáveis, destinando-os para a reciclagem e/ou para a compostagem, sendo os lodos de esgoto e os restos de alimentos alguns dos principais focos deste programa.

Estudos realizados por Santos et al. (2006), no Município de Manaus apontam o alto grau poluidor dos aterros sanitários sobre as águas superficiais e subsuperficiais adjacentes ao aterro sanitário do município.

Neste contexto, observa-se que disposição de resíduos orgânicos (no qual se insere o lodo de esgoto) em aterros sanitários ainda é uma prática muito disseminada no Brasil. Todavia este procedimento esta sendo alvo de restrições devido aos problemas ambientais anteriormente discutidos.

Diversos países já adotam instrumentos legais e econômicos para restringir o uso do aterro sanitário, buscando desta forma a reciclagem do lodo de esgoto e de outros resíduos. Por exemplo, destaca-se a Comunidade Econômica Européia, que desde 2002, está impondo restrições à utilização dos aterros sanitários, considerando que esta prática apresenta diversos prejuízos, como os maiores custos econômicos e os prejuízos ambientais. Somada a uma política de reciclagem, a utilização de aterros sanitários deve acontecer apenas para resíduos não recicláveis. Desta forma, deve ocorrer o aumento da utilização agrícola do lodo de ETE, sendo necessário, estudos para que a aplicação agrícola do lodo de esgoto seja feita de uma forma ambientalmente segura.

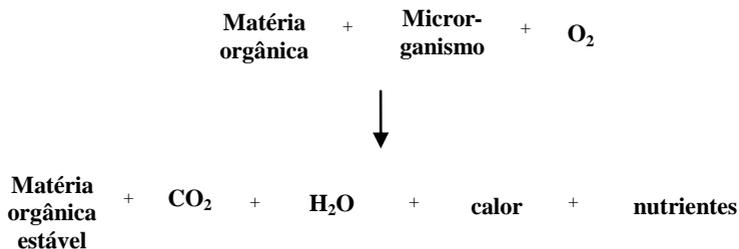
Como alternativa, os resíduos recicláveis devem ser separados e reciclados, enquanto que o descarte dos resíduos orgânicos, que compõem até 60% do peso total do lixo comum, deve ser realizado de forma que minimize seus impactos ambientais negativos, bem como contribua para a ciclagem dos seus nutrientes. Neste sentido a compostagem termofílica é uma alternativa viável, pois além de diminuir os efeitos ambientais indesejáveis, tem como produto final um ótimo condicionador de solo.

3.3.1. Compostagem

3.3.1.1 Características Gerais

A compostagem é um processo de decomposição controlada de resíduos orgânicos que resulta na produção de substâncias similares, em composição, ao húmus do solo e de minerais, por meio da atuação de microorganismos e de reações fisioquímicas (PAIGNÉ & GIRARDIN, 2004). Como é um processo, obrigatoriamente, aeróbio, na compostagem a ação da degradação biológica usa o O₂ para transformar o carbono do substrato orgânico e obter energia, CO₂, água e calor (INÁCIO & MILLER 2009). No esquema abaixo, pode-se observar um esquema simplificado do processo da compostagem:

Figura 2 - Simplificação do processo de compostagem



Fonte: Fernandes & Silva (1999)

Observa-se que parte do carbono resultante da degradação orgânica, durante o processo aeróbio é o dióxido de carbono (CO_2), cujo potencial poluidor é 25 vezes menor do que o do metano (CH_4), produzido em aterros sanitários. Outra parte do carbono ficará fixada como matéria orgânica estável, beneficiando as características físicas e químicas do solo.

Neste processo, os componentes orgânicos biodegradáveis passam por etapas sucessivas de transformação sob ação de diversos grupos de microorganismos, resultando em um processo biogeoquímico altamente complexo (FERNANDES & SILVA, 1999), sendo que o produto de um grupo de microorganismos é o ponto de partida ideal para outro grupo de microorganismos (INÁCIO & MILLER, 2009).

Segundo Haug (1993), o processo de compostagem pode ser dividido em três etapas de acordo com a temperatura no interior da leira: A primeira fase, denominada de “Fase mesofílica” é caracterizada por apresentar temperaturas abaixo dos 45°C , e está associada ao início do processo, quando os microorganismos estão em período de colonização do resíduo orgânico depositado na leira. Devido à intensa atividade microbiana no resíduo orgânico, ocorre um aquecimento desta leira, proporcionando a denominada “Fase termofílica”, segunda fase, que é caracterizada por temperaturas acima dos 45°C e predominância de bactérias no processo. Esta etapa persiste até que estes microorganismos decomponham os resíduos orgânicos de fácil degradação (carboidratos, proteínas, óleos, etc.) presentes na matéria orgânica. Por fim, ocorre a terceira fase, que se caracteriza pela diminuição da temperatura, denominada de “Maturação”, onde os resíduos orgânicos de difícil degradação (lignina, celulose, hemicelulose) serão decompostos pela

atividade microbiana. Esta etapa esta mais relacionada à degradação pelos fungos.

Os nutrientes, principalmente carbono e nitrogênio, são fundamentais ao crescimento bacteriano na compostagem. O carbono é a principal fonte de energia e o nitrogênio é necessário para a síntese celular. Fósforo e enxofre também são importantes. Os microorganismos têm necessidade dos mesmos micronutrientes requeridos pelas plantas: Cu, Ni, Mo, Fe, Mn, Zn e Cl que são utilizados nas reações enzimáticas, porém, os detalhes deste processo, ainda são pouco conhecidos. (EPSTEIN, 1997)

De acordo com WEF (1996), os principais objetivos da compostagem são:

- Conversão biológica da matéria orgânica putrescível numa forma estabilizada;
- Destruição de patógenos;
- Promoção da biorremediação e biodegradação de resíduos perigosos;
- Redução da massa total dos resíduos orgânicos através da remoção de água e sólidos voláteis;
- Produção de produto final utilizável;
- Diminuição das quantidades de resíduos depositados em aterros sanitários.

Além destes benefícios diretos, o uso do composto orgânico na agricultura pode destacar benefícios ambientais como a redução da contaminação dos recursos hídricos, o aumento da vida útil dos aterros e a mitigação de emissão de metano oriundo da disposição de resíduos urbanos (INÁCIO & MILLER, 2009).

Estes mesmos autores ainda destacam os benefícios ao solo relacionados ao uso do composto, tais como: fonte de matéria orgânica e nutrientes, elevação da CTC, aumento da estabilidade do pH, melhora o aproveitamento dos fertilizantes químicos, incremento de microbiota no solo e supressão de fitopatógenos.

Além destes benefícios, Kiehl (1985) indica que, no composto, a maior parte dos nutrientes, especialmente nitrogênio, fósforo e enxofre, estão conservados na forma orgânica (matéria orgânica) e na biomassa microbiana, sendo que apenas uma pequena parte dos nutrientes já se encontra em estado mineral. O produto final tem baixa atividade biológica, mas é rico em microorganismos e restos de microorganismos (parede celular e conteúdo citoplasmático). Desta forma, a

compostagem retém a maior parte dos nutrientes presentes no material original, o que proporciona ao produto final a característica de liberar lentamente os nutrientes contidos nele, não ocorrendo, portanto saturações do solo, principalmente com nitrogênio. Apesar disto, em relação ao nitrogênio, uma fração deste é perdida na forma de amônia que volatiliza junto com o vapor de água. A prática adotada e os próprios materiais da compostagem influenciam esta perda (INÁCIO & MILLER, 2009).

A compostagem está longe de ser uma atividade de preocupante potencial poluidor, pois, como processo controlado, é uma biotecnologia para transformar resíduos orgânicos em um benefício ambiental (INÁCIO & MILLER, 2009). Entretanto, segundo Golueke (1984):

“a qualidade do processo repousa sobre alguns aspectos específicos: Evitar a proliferação de moscas e a atratividade de outros vetores; Evitar a ocorrência de odores fortes e desagradáveis; Evitar excessiva produção de chorume; Gerar um produto final sem riscos de contaminação do solo, água e adequado ao manuseio; Adequado uso na agricultura e recuperação do solo. Basicamente, estes aspectos são dependentes das altas temperaturas proporcionadas durante o processo de compostagem, os quais também garantem a ausência de patógenos no produto final que será manuseado”.

3.3.1.2. Leiras estáticas com aeração natural “Método UFSC”

Existem diferentes métodos de compostagem, que se diferenciam: pelo porte, pela tecnologia, pelos custos, pela mão de obra, pela área, pelo tipo de aeração, pelo grau de revolvimento, e se é realizado em leiras ou em reatores. (EPSTEIN, 1997). Os principais métodos são: compostagem com revolvimento de leiras, leiras estáticas com aeração forçada, compostagem em sistemas fechados (*In Vessel*) e leiras estáticas com aeração natural (INÁCIO & MILLER, 2009). Na Tabela 1 estão expostos os principais métodos de compostagem, destacando as especificidades de cada um deles.

Tabela 1 - Métodos de compostagem e suas características

Compostagem com revolvimento de leiras	Compostagem com leiras aeração forçada	Compostagem em reatores	Compostagem com leiras estáticas e aeração natural
+ Difundido	Eficiente controle de moscas e produção de percolado	Necessita áreas pequenas	Baixo custo de implantação
Baixo custo de implantação	Alto custo de implantação	Diminui o tempo do processo	Baixo custo de operação
Alto custo operacional	Alto custo operacional	Produz um material mais homogêneo	Eficiente controle de moscas e emissão de percolado
Dificuldade para controlar moscas e emissão de odores	Necessita áreas extensas	Alto custo de implantação	Necessita de áreas menores
Necessita áreas extensas	Acelera o processo	Alto custo operacional	Alto custo de mão de obra
Alta produção de percolado		Necessita pouca mão de obra	Alta suscetibilidade ao clima

Na presente pesquisa utilizou-se o método de Leiras estáticas com aeração natural (Método UFSC), devido às altas temperaturas alcançadas, a baixa necessidade de mão de obra, o baixo custo, e a experiência obtida com este método decorrente do Projeto de Extensão da UFSC (1994-2011) denominado “Compostagem de resíduos orgânicos” que atua no Campus Universitário por mais de 15 anos.

Por ser um método, ainda pouco difundido no resto do mundo, mesmo no Brasil, o referencial teórico básico adotado nesta pesquisa, é o livro de Inácio & Miller (2009), publicado pela EMBRAPA, intitulado “Compostagem: ciência e prática na gestão de resíduos orgânicos”, onde este método é muito bem descrito.

Este método, segundo Inácio & Miller (2009) se caracteriza pelo emprego de algumas técnicas específicas, sendo elas:

- Formato das leiras: as paredes da leira neste método apresentam ângulo perpendicular ao solo (paredes retas), normalmente com utilização de palha;

- Leiras estáticas: as leiras permanecem fixas, portanto não são deslocadas como em outros métodos, nem mesmo revolvidas;

- Densidade do substrato: alta carga de material estruturante, com alta relação C/N, e com pelo menos 1/3 do volume total;

- Carga contínua: novas cargas periódicas, conforme monitoramento da leira, ou seja, a leira ganha altura no decorrer do processo;

- Mistura de camadas: a cada nova carga, o material da carga anterior (situado mais no fundo da leira) é misturado a esta nova camada, proporcionando a inoculação deste novo material, o que otimiza e acelera o processo;

- Cobertura: uma ampla cobertura da leira com material vegetal, de preferência gramínea. Esta camada tem a função de evitar a exposição dos alimentos a vetores, bem como funcionar como um tampão, evitando assim a perda de calor da leira.

A forma retangular das leiras estáticas tem papel na manutenção e controle do fator ecológico mais importante, o oxigênio (aeração). Ao contrário do que algumas literaturas técnicas brasileiras descrevem; o formato piramidal não é necessariamente o mais adequado para as leiras de compostagem, mesmo em períodos chuvosos (INÁCIO & MILLER, 2009). Ainda em relação à aeração, em sistemas que utilizam a aeração forçada, deve-se ter muito cuidado, pois muitas vezes a mesma pode remover a umidade e conseqüentemente diminuir a temperatura, causando problemas na qualidade final do produto e na eficiência da eliminação de patógenos (PINTO, 2010). Neste tipo de leiras (estáticas com aeração natural), os operadores devem, basicamente, observar as temperaturas no seu interior, através de termômetros, pois reduções abruptas, a valores abaixo de 55° C, são sintomas de interrupção do processo termofílico.

Um autor que observou este método de compostagem da UFSC foi Buttenbender (2004), e assim o definiu do ponto de vista operacional, o sistema de compostagem termofílica em leiras estáticas caracterizou-se como um processo flexível, de baixo custo, que utiliza equipamentos simples, sanitariamente adequados, e principalmente por requerer mão de obra reduzida, eliminando o revolvimento periódico da massa do composto. A configuração da leira, associada ao sistema de

aeração, permitem a permanência de altas temperaturas termofílicas durante o período de 120 dias. O elevado período de exposição dos agentes patogênicos a altas temperaturas gerou um composto orgânico isento de coliformes fecais nas quatro amostras analisadas. Ficou constatado, ainda, o controle dos principais aspectos ambientais prejudiciais, como os vetores, os odores e o excesso de percolados.

Para a otimização do processo, todo o manejo é baseado no entendimento dos fatores ecológicos, que afetam a atividade biológica, principalmente a entrada de oxigênio, a umidade, a densidade, a disponibilidade do substrato e pela ênfase na arquitetura da leira. Desta forma, procura-se confeccionar a leira de compostagem para que todo o processo ocorra sem a necessidade de intervenção, ou interferência mínima, satisfazendo aos requisitos antes colocados. (INÁCIO & MILLER, 2009)

3.3.1.3. Controle dos fatores ecológicos na compostagem

De acordo com Miller (1993) o entendimento racional da ecologia da compostagem provê as melhores bases para o desenvolvimento e estratégias de controle do processo. Isto inclui o conhecimento sobre os fatores físicos, químicos e biológicos que determinam (e são seletivos para) a estrutura das comunidades microbianas e para as rotas da atividade metabólica dentro do processo de compostagem.

A biodecomposição aeróbia e termofílica ocorrerá apenas a partir de certas condições na estrutura da leira que permitam: transferência de calor, transferência do fluxo de ar e de vapor e do balanço de umidade. Tais fenômenos são manejados a partir de práticas de montagem da leira de compostagem, e não apenas ao longo do processo, o que torna necessário conhecer a influência do manejo das leiras de compostagem na dinâmica microbiana, e conseqüentemente no processo de compostagem. Técnicas amplamente difundidas, como a aeração forçada e o revolvimento, podem não favorecer o processo aeróbio e termofílico como esperado e necessário, e isto tem levado a problemas sérios como a emissão de odores, produção excessiva de percolado e proliferação de moscas, que se traduzem na falta de segurança e qualidade do processo (INÁCIO & MILLER, 2009).

De forma geral, são cinco os principais fatores a serem observados para a otimização do processo da compostagem: aeração,

calor, pH, umidade, relação C/N e a utilização de microrganismos adaptados (inóculo). Destaca-se que estes fatores estão inter-relacionados e, portanto, o manejo de um destes acarreta em alterações dos outros.

3.3.1.3.1. Oxigenação

Por ser um processo predominantemente aeróbio, é indispensável no interior da leira a presença de oxigênio, o que ocorre devido à porosidade da pilha de composto. O oxigênio serve para os microrganismos se alimentarem da matéria orgânica por respiração oxidativa (EPSTEIN, 1997).

Processos de compostagem requerem uma concentração mínima entre 5 e 10% de O₂ dentro dos espaços porosos da leira (RYNK, 1992), com base em evidências de que os organismos termofílicos são ativos em concentrações acima de 5% de O₂ (RANDLE & FLEGG, 1978).

Segundo Epstein (1997) o fluxo de oxigênio está estritamente relacionado ao fluxo de calor. Este ocorre por convecção e por difusão, sendo função: do diferencial de temperatura com o ambiente, do fluxo de ar na superfície da leira, da porosidade da mistura e do conteúdo de água nos poros. Inicialmente, as áreas internas das leiras são anaeróbias, mas tornam-se aeróbias ao longo da fase termofílica, acompanhando a evolução da temperatura.

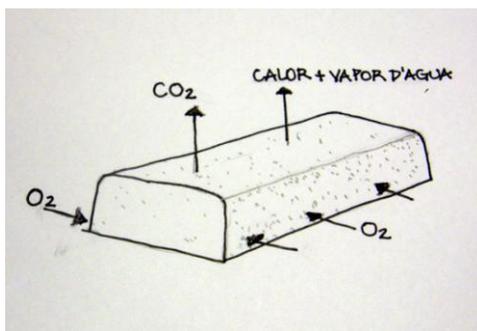
Este mesmo autor afirma que as mudanças na concentração de oxigênio são resultado da interação de três fatores: O₂ consumido pelos microrganismos, O₂ repostado pela movimentação de ar (convecção) e por fim, pela troca de gases (difusão). Se a concentração de O₂ se reduz, isso indica que seu consumo é maior do que a taxa de reposição por condução ou convecção, sendo o oposto também verdadeiro (RANDLE & FLAGG, 1978).

Portanto, leiras estáticas com laterais verticais são construídas para promover a convecção de ar. O formato retangular proporciona maior superfície de entrada de ar “frio” (temperatura ambiente) pelas paredes laterais, e também um fluxo direcionado ascendente para a saída do ar quente (temperatura interna da leira) e do vapor de água. A saída ascendente do ar, devido ao aquecimento interno, gera um gradiente de pressão negativo no interior da leira suficiente para promover o fluxo de ar por convecção e a entrada do ar externo numa taxa satisfatória durante a compostagem (INÁCIO & MILLER, 2009). Desta forma, em

um processo com aeração passiva, o fornecimento de O_2 exige um fluxo de ar de fora para dentro da leira, e é dependente de altas temperaturas geradas no interior da leira.

A aeração também remove o gás carbônico, água e calor, como pode ser observado na ilustração representativa do fluxo de ar em leiras de compostagem retangular com aeração natural (Método UFSC).

Figura 3 - Fluxo de ar em leiras de compostagem com aeração natural



Fonte: Desenho do autor Baseado em Inácio & Miller (2009)

O lodo de ETE, por ser um material com granulometria muito fina, quando parcialmente desidratado se torna pastoso e gera dificuldades para a circulação do ar devido à baixa porosidade do material. Por isto, é necessário que sejam misturados ao lodo outros resíduos com granulométrica mais grosseira, servindo como agente estruturante, permitindo assim a livre difusão do oxigênio no interior da leira (FERNANDES & SILVA, 1999).

3.3.1.3.2. Calor

A produção de calor no interior da leira está intimamente relacionada ao consumo de oxigênio, pois é a utilização do oxigênio pelos microorganismos que produz calor no interior da leira de compostagem.

Segundo Epstein (1997), no processo de compostagem de leiras é fundamental favorecer a produção de calor, e principalmente manejar a

transferência de calor dentro da leira e sua saída junto ao vapor de água. Neste sentido, as perdas de calor ocorrem de forma mais intensa a partir do calor sensível na saída de gases da leira, em forma de calor latente da evaporação do vapor de água e ainda de forma menos intensa por condução, convecção e radiativa. A baixa condutividade térmica da matéria orgânica também contribui para redução das perdas por condutividade e resulta em grande acúmulo de calor.

Segundo Miller (1993), em muitas configurações de leiras de compostagem, tal como as leiras piramidais não ocorre uma significativa convecção, enquanto que em leiras com formato retangular, isto é, com laterais verticais, observa-se significativa transferência de calor por convecção, o que é importante para a manutenção do fluxo de oxigênio e, portanto de produção de calor.

Segundo Fernandes & Silva (1999) e Epstein (1997), as temperaturas da compostagem devem se encontrar entre 55°C e 65°C, uma vez que valores abaixo deste intervalo não são eficientes na eliminação de patógenos e valores acima reduzem a atividade microbiana, tornando o processo muito lento. Todavia, Inácio & Miller (2009) indicam que apesar de diversos autores citarem a importância de se controlar a temperatura em torno de 55° C para evitar perdas de nitrogênio e inibição da atividade microbiana termofílica, na compostagem de materiais com potenciais cargas de organismos patogênicos, o manejo do fluxo de calor é fundamental. Assim, a elevação da temperatura ao máximo garante uma melhor higienização deste material, sendo este parâmetro mais importante do que o tempo de maturação do material e/ou suas características químicas.

3.3.1.3.3. Umidade

A umidade durante o processo de compostagem afeta diretamente a atividade microbiana, uma vez que a água é fundamental para a vida microbiana. (FERNANDES & SILVA, 1999) e consequentemente influencia a temperatura e o tempo de degradação (EPSTEIN, 1997).

Desta forma, a manutenção da umidade adequada é importante por dois motivos: a água é necessária para o metabolismo microbiano, sendo a sua escassez prejudicial; e porque a água concorre com o oxigênio pelos espaços porosos no interior da leira, sendo o seu excesso também prejudicial (INÁCIO & MILLER, 2009). Segundo Miller (1993), o intervalo de umidade ideal é de 40-65%. Valores abaixo deste

intervalo prejudicam a sobrevivência microbiana e, portanto a degradação dos resíduos. Valores acima de 60% dificultam a continuidade dos poros da leira, o que pode acarretar sítios de anaerobiose (PEIGNÉ & GIRARDIN, 2004).

A utilização de material estruturante também diminui a perda de umidade da leira, uma vez que serve como um tampão, impedindo a saída de água via vapor, mesmo em condições desfavoráveis como na ocorrência de ventos secos.

A umidade durante o processo de compostagem pode ser elevada devido à pluviosidade local. Este fenômeno pode acarretar na diminuição da condição aeróbia da mistura, uma vez que a água compete com o ar pelos espaços porosos, diminuindo as concentrações de oxigênio e consequentemente limitando a atividade microbiana aeróbia. (EPSTEIN, 1997, INÁCIO & MILLER, 2009).

3.3.1.3.4. Relação C/N

A principal influencia da relação C/N está relacionada ao tempo de degradação dos resíduos. Quanto maior esta relação, maior será o tempo de decomposição, e quanto menor for esta relação menor será o tempo de decomposição (INÁCIO & MILLER, 2009).

A relação C/N da mistura tem, segundo Inácio & Miller (2009), efeito direto na porosidade da leira, que também é influenciada pela granulometria dos materiais. Materiais com alta relação C/N, e com alto grau de lignificação como podas urbana e aparas de madeira conferem “forte estrutura” à leira. Por outro lado, materiais com baixa relação C/N costumam apresentar carbono facilmente disponível, o que fragiliza sua estrutura logo que se inicia a biodegradação. Em geral, o excesso de materiais com baixa relação C/N leva ao colapso da leira, interrompendo o processo aeróbio e reduzindo a temperatura.

A relação C/N também tem grande influencia sobre a dinâmica do nitrogênio. Se há carbono energético em abundância todo o nitrogênio proveniente da degradação será assimilado na biomassa microbiana, evitando perdas de nitrogênio por volatilização da amônia (NH₃) durante a fase termofílica, o que poderia acarretar perdas no valor agrônômico do produto final. Duas condições levam a perda de N: o excesso de N e a falta de C disponível. Assim, devem-se buscar materiais com muito carbono e ter atenção especial aos fatores ecológicos que influenciam a atividade microbiana da leira (INÁCIO & MILLER, 2009).

A relação C/N ideal para o início do processo se situa entre 25:1-30:1. No final do processo este valor cai para aproximadamente 10:1, pois grande parte do carbono é liberada para a atmosfera na forma de CO₂ (EPSTEIN, 1997). Segundo Miller (1993), a relação C/N acima de 20:1 no produto final deve ser vista com precaução, uma vez que pode significar que o composto não esteja estabilizado, ou seja, ainda sofrerá forte ação microbiológica decompositora quando colocados no solo. Isto significa que os microorganismos do solo irão aproveitar o carbono disponível neste composto imaturo para obter energia e, com isto, imobilizar para seu metabolismo o nitrogênio e o fósforo, concorrendo com a absorção pelas raízes. Este fenômeno, denominado “imobilização microbiana de nutrientes” pode resultar em carência nutricional das plantas, especialmente de N (EPSTEIN, 1997).

Como o lodo de esgoto apresenta uma baixa relação C/N (entre 5 e 11), é indispensável a mistura deste com outros resíduos com alta relação C/N, que estejam disponíveis nas proximidades do pátio de compostagem, para que a mistura de todos os componentes de aproxime da relação 30:1 (PINTO, 2010; FERNANDES & SILVA, 1999; TSUTIYA et al., 2001).

3.3.1.3.5. pH

O pH está diretamente relacionado à sobrevivência dos organismos que degradam a matéria orgânica. Além disto, os seus efeitos podem ser observados na manutenção de alguns nutrientes na compostagem. Se o pH for maior que 7,5 são grandes as chances de haver volatilização da amônia e perda de N durante a compostagem (SILVA, 2008b).

O pH de cada resíduo utilizado na mistura para a compostagem vai influenciar a dinâmica microbiana, principalmente na fase inicial da compostagem. Deve-se prestar atenção para se formar misturas que resultem em um pH médio entre 5 e 7, plenamente satisfatório para a atividade microbiana.

No início da decomposição da matéria orgânica o meio se torna ácido pela liberação de ácidos orgânicos, mas em seguida ocorre uma estabilização do pH próximo a 7 devido a formação de ácidos húmicos. O pH sofre também o efeito da mineralização do N orgânico, pois a maior parte do N da matéria orgânica é transformada em N amídico e

depois em N amoniacal, elevando assim o pH devido a reação alcalina, característica da amônia (FIALHO, 2005).

Como o pH do lodo é próximo de 7, ele está adequado para ser utilizado na compostagem (FERNANDES & SILVA, 1999).

3.3.1.3.6. Agente estruturante

A estrutura da leira está diretamente relacionada à aeração, sendo que quanto mais porosa, maior será a área de contato com o oxigênio. (FERNANDES & SILVA, 1999). De modo geral, a massa da leira deve apresentar uma porosidade de 30-36% para otimizar o processo de compostagem. Sugere-se que o tamanho das partículas deva ter entre 25 e 75 mm.

Epstein (1997), afirma que o aumento do peso específico da mistura inicial tende a dificultar a aeração passiva (fluxo de ar) da leira da compostagem, resultando na diminuição dos valores de O₂ para atender a demanda da atividade microbiana. Para minimizar este problema, a utilização de materiais estruturantes reduz o peso específico e em geral aumenta a relação C/N. Podas de árvores trituradas, casa de arroz, entre outros são materiais que podem ser utilizados com esta função, pois diminuem a densidade da leira, e conseqüentemente aumentam sua porosidade, sendo muito importantes para a manutenção da aeração passiva (INÁCIO & MILLER, 2009).

A utilização de materiais estruturantes também é muito importante para a manutenção do calor da leira. Através do uso de um resíduo estruturante como material volumoso e da sua disposição por camadas, o calor que sobe, por convecção no processo de leiras estáticas, é armazenado. A utilização do material estruturante tem dois efeitos na retenção do calor. O primeiro, relacionado à manutenção da temperatura, devido à baixa condutividade térmica da madeira (0,06kcal/mCh). O segundo, quando relacionado à manutenção da umidade. Isto é importante já que o armazenamento de calor é fortemente determinado pela água, devido ao seu calor específico, e porque o conteúdo de água é em média 2/3 da massa do composto. Portanto, a serragem (ou outro agente estruturante com características semelhantes) funciona como uma esponja, evitando a saída de água quente (com muito calor) (INÁCIO & MILLER, 2009). Para ressaltar este efeito de retenção de água Macgregor (1981), apud Miller (1993), afirma que aproximadamente 90% da remoção do calor ocorre via

evaporação, e apenas 10% pelo calor sensível, baseado em condições de suprimento de ar.

Além de contribuir para a estrutura da leira, para a oxigenação e para a manutenção do calor, os resíduos estruturantes contribuem na absorção do excesso de umidade e para equilibrar a relação C/N da mistura. De forma geral, um bom estruturante deve ter: granulometria que confira integridade estrutural a leira, grande área superficial específica, baixa umidade e alta relação C/N. Sendo assim, os resíduos vegetais são os mais importantes agentes estruturantes que têm sido utilizados (FERNANDES & SILVA, 1999). Além disto, a escolha do agente estruturante deve considerar os aspectos práticos, como a disponibilidade do resíduo, as distâncias do transporte e as características finais desejadas.

Na tabela abaixo, proposta por Fernandes & Silva (1999) são apresentadas as características de alguns resíduos vegetais que podem ser utilizados como agentes estruturantes na compostagem do lodo.

Tabela 2 - Características químicas de agentes estruturantes

Resíduo estruturante	C%	N%	C/N	H₂O %	Sólidos fixos (% em relação aos sólidos totais)	P%	PH
Resíduo de podas de árvores	51	1,1	46	30	9	0,09	6,9
Bagaço de cana de açúcar	47	0,20	235	20-40	3	0,1	3,7
Serragem de madeira	49	0,10	490	30	2	0,50	8,0
Sabugo de milho	40	0,30	115	10	7	0,30	7,5
Palha de trigo	43	0,50	86	6	5	0,50	7,5
Cascas de café	46	1,20	38	10	5	0,08	5,1

Fonte: Fernandes & Silva (1999)

3.3.1.3.7. Inoculante

Além do material estruturante, recomenda-se para a compostagem de lodo de ETE a mistura com um composto em fase final de maturação, uma vez que coloniza este material com organismos adaptados à compostagem, acelerando o processo. Neste caso, o inoculante deve representar entre 5 e 10% do volume total (FERNANDES & SILVA, 1999).

3.3.1.4. Compostagem e patógenos

Em estudo dirigido por Gerba & Smith (2005), foram obtidos os seguintes tempos de sobrevivência no solo de alguns patógenos: Bactérias - 2 meses a um ano; protozoários - 2 a 10 dias; Ovos viáveis de helmintos - 2 a 7 anos. A partir destes e de outros resultados, podemos destacar que, como as bactérias e protozoários são rapidamente reduzidos pelos efeitos das condições locais, não podem ser considerados bons indicadores de saúde pública (LIMA, 2010). Já os ovos de helmintos e os vírus, devido à maior capacidade de resistência podem ser utilizados com este fim (GASPARD & SCHWARTZBROD, 2001). Resultados semelhantes foram observados por Epstein (1997), conforme Tabela 3.

Devido ao longo tempo de permanência de patógenos no solo, somado à grande quantidade destes no lodo de ETE, a compostagem surge como alternativa para minimizar este problema. Uma vez que, a partir da respiração aeróbia dos microorganismos, ocorre uma farta produção de calor no interior da leira de compostagem. Este calor, que permanece por vários dias, pode ser utilizado como forma de higienizar o lodo. Neste sentido, Rink (1992) coloca que as normas para a operação de pátios de compostagem têm apontado que a temperatura crítica para destruição de patógenos humanos ocorre a partir de 55° C. Na tabela, a seguir, demonstra-se a relação temperatura/tempo de exposição para a eliminação de diversos patógenos humanos.

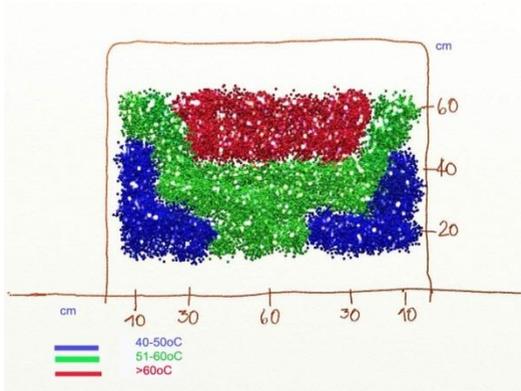
Tabela 3 - Tempo de sobrevivência de patógenos em resíduos sólidos e no solo

Microorganismo	Doenças	Tempo de sobrevivência			
		Em resíduos sólidos (dias)	No solo (dias)	Na compostagem (minutos em determinada temperatura)	
Bactérias					
<i>Salmonella Typhi</i>	Febre tifóide	29-70	1-280	30	60 ⁰ C
<i>Salmonella paratyphi</i>	Febre paratífóide	29-70		20	60 ⁰ C
<i>Shigella</i>	Desintéria bacilar	02-07	2-80	60	53 ⁰ C
Coliformes fecais	Gastroenterites	35		60	60 ⁰ C
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	Tuberculose	150-180	10-40	20	60 ⁰ C
Vírus					
<i>Poliovírus</i>	Poliomielite	20-70		25	70 ⁰ C
Helmintos					
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariíase	2000-2500		60	52 ⁰ C
<i>Trichuris trichiura</i>	Trichiuríase	1800		7	55 ⁰ C
<i>Necator americanus</i>	Ancilostomose	35	<180	50	45 ⁰ C
Protozoários					
<i>Entamoeba histolytica</i>	Amebíase	08-12	08-10	5	52 ⁰ C

Fonte: Epstein (1997)

Cabe destacar ainda, que a temperatura dentro de uma leira de compostagem não é homogênea, embora deva estar sempre dentro da faixa termofílica. Epstein (1997) coloca que o centro e o alto da pilha tendem a ser mais quentes, enquanto que as bordas normalmente são mais frias. Em estudo realizado no Brasil, foram encontrados dados semelhantes, pois conforme Teixeira (2009) existem diferenças de temperatura, tanto em relação às diferentes alturas quanto em relação às diferentes larguras em leiras que utilizam o “Método UFSC” (Figura 4).

Figura 4 - Perfil da temperatura em leiras estáticas com aeração natural



Fonte: Desenho do autor

Além da relação temperatura/tempo de exposição, Inácio & Miller (2009) afirmam que o antagonismo microbiano, também é um fator que possibilita o controle de patógenos. Esta visão também é compartilhada por Noble & Coventry (2005) e Howard (2007) que indicam que o composto seja um meio naturalmente supressivo a patógenos já que durante o processo de compostagem, milhares de microrganismos estão envolvidos numa sucessão ecológica, que se altera conforme a variação da temperatura, eliminando microrganismos mais sensíveis a tais mudanças (Brito et al. 2010). A diversidade microbiológica responsável pela degradação da matéria orgânica inclui actinomicetos donde se destaca o gênero *Streptomyces*, fonte natural de estreptomomicina, um antibiótico de amplo espectro (WAKSMAN, 1945).

Em síntese, para que possa ser aplicado na agricultura, de forma segura, todo lodo de esgoto deve passar por algum tratamento adicional de modo a situar-se dentro dos parâmetros definidos por lei (ver capítulo Legislação) (ANDREOLLI et al., 2001; PINTO, 2010; ABREU JUNIOR et al., 2005; INÁCIO & MILLER, 2009). A via térmica é uma das mais difundidas formas de higienização de resíduos contaminados, e nesta, a combinação de tempo, de exposição e temperatura são os fatores preponderantes para a eliminação de patógenos. A compostagem, por alcançar valores acima de 60°C, e por apresentar uma dinâmica

microbiana é considerada uma forma eficiente e segura de higienização do lodo em diversos países (PINTO, 2010) gerando um produto sanitariamente seguro (FERNANDES & SILVA, 1999).

3.4. Legislação para higienização de lodo de esgoto no Brasil

3.4.1. Definição legal para lodo de esgoto e produtos derivados

Para a aplicação agrícola do lodo de esgoto, há que se considerar as restrições legais quanto aos valores máximos admitidos para patógenos presentes (coliformes, helmintos, *Salmonella* e vírus), bem como de substancias inorgânicas tóxicas.

No Brasil, a Instrução Normativa 23/2005 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2005), tem como objetivo “Aprovar as definições e normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados a agricultura”. Esta Legislação foi revogada em 2009 pela IN 25 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2009), todavia os artigos trabalhados neste trabalho tiveram alterações pouco expressivas de uma instrução normativa para outra.

Estas Instruções Normativas, em seu anexo 1, artigo 1º, definem Lodo de esgoto como:

“[...] matéria prima proveniente do sistema de tratamento de esgotos sanitários, possibilitando um produto de utilização segura na agricultura, atendendo aos parâmetros estabelecidos no Anexo III e aos limites máximos estabelecidos para contaminantes.”

Neste mesmo anexo, artigo 2º, são classificados os fertilizantes orgânicos, em quatro classes, “[...] de acordo com as matérias primas utilizados na sua produção”, sendo:

Classe A - “Fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza matéria-prima de origem vegetal, animal ou de processamentos de agroindústrias, onde não sejam utilizados no processo metais pesados tóxicos, elementos ou compostos orgânicos sintéticos potencialmente tóxicos, resultando em produto de utilização segura na agricultura”.

Classe B - “Fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza matéria-prima de origem vegetal, animal ou de processamentos de agroindústrias, onde metais pesados tóxicos, elementos ou compostos orgânicos sintéticos potencialmente tóxicos são utilizados no processo, resultando em produto de utilização segura na agricultura”.

Classe C - “Fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza qualquer quantidade de matéria prima oriunda de lixo domiciliar, resultando em produto de utilização segura na agricultura.”.

Classe “D” - “Fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza qualquer quantidade de matéria-prima oriunda do tratamento de despejos sanitários, resultando em produto de utilização segura na agricultura”.

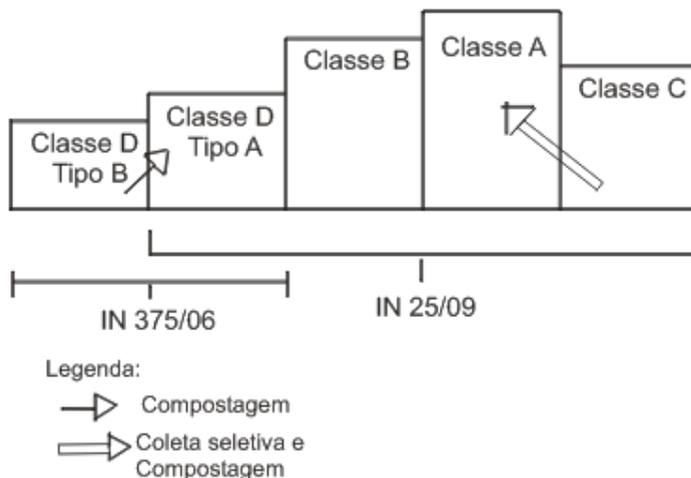
Pode-se observar que a diferença entre as Classes “A” e “B” é em relação à utilização de metais pesados tóxicos e/ou compostos orgânicos sintéticos potencialmente tóxicos na matéria prima.

Em relação à “Classe C” é importante fazer uma ressalva em relação ao que consiste o lixo domiciliar. Neste caso, está relacionado ao resíduo que não sofreu uma correta separação (coleta seletiva), onde está misturada a fração orgânica com os resíduos recicláveis e/ou sanitários. No caso de compostagem exclusiva de resíduo orgânico, o mesmo pode ser classificado como Classe A ou Classe B, de acordo com os critérios que distinguem estas duas categorias.

O lodo de esgoto e o composto deste lodo (objetos de estudo desta pesquisa), segundo a Legislação Brasileira, são enquadrados como “Classe D”.

Outra legislação, a Resolução 375/06 (BRASIL, 2006) do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), órgão ligado ao Ministério do Meio Ambiente (MMA) classifica os produtos derivados de lodo de esgoto em dois tipos: Tipo A e Tipo B, de acordo com as concentrações de organismos patogênicos presentes nestes materiais, sendo o Tipo A um material com maior segurança sanitária e, portanto com menores restrições de uso. A figura a seguir busca resumir estas duas legislações:

Figura 5 - Classificação dos fertilizantes orgânicos conforme IN 25/09 do MAPA e dos produtos derivados de estações de tratamento conforme Resolução 375/06 do MMA



A Resolução 375/06 afirma que o material classificado como Tipo B pode ser utilizado na cultura do café, para produção de fibras, na silvicultura e para a produção de óleo, como o girassol e a soja. Já o material classificado como Tipo A pode ser utilizado em frutíferas, como a banana e a maçã.

A classificação dos fertilizantes orgânicos tem como objetivo restringir a utilização dos fertilizantes com alto potencial poluidor, atribuindo aos fertilizantes “Classe D” as seguintes restrições de acordo com o anexo IV da IN 25/09 (BRASIL, 2009).

Tabela 4 - Restrições de uso para fertilizantes orgânicos

Classe do fertilizante	Restrição de uso
Classe D	Aplicação somente através de equipamentos mecanizados. Durante o manuseio e aplicação, deverão ser utilizados equipamentos de proteção individual (EPI); Uso proibido em pastagens e cultivos de olerícolas, tubérculos e raízes, e culturas inundadas, bem como as demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo.

Fonte: Instrução Normativa do MAPA 25/09

3.4.2. Patógenos

A Resolução 375/06 (BRASIL, 2006) estabelece “[...] 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”.

No artigo 3º desta resolução é determinado que “Os lodos gerados em sistemas de tratamento de esgoto, para terem aplicação agrícola, deverão ser submetidos a Processo de Redução de Patógenos e da Atratividade de Vetores” (PRPAV) e por um Processo de Redução Significativa de Patógenos (PRSP).

O Processo para Redução da Atratividade de Vetores (PRAV) requer, no caso da compostagem, que a biomassa seja mantida a “temperaturas acima de 40° C por pelo menos 14 dias, e que a temperatura média durante este período seja maior que 45 °C”.

Para que o bio sólido passe pelo Processo de Redução Significativa de Patógenos (PRSP) é necessário que “a biomassa atinja a temperatura mínima de 40° C durante pelo menos cinco dias, com ocorrência de um pico de 55° C, ao longo de quatro horas sucessivas durante este período” (BRASIL, 2006).

De acordo com a eficiência na redução de patógenos, o lodo de esgoto ou produto derivado pode ser ainda classificado como “Tipo A” ou “Tipo B. O lodo ou produto derivado “Tipo B”, é aquele que passa apenas pelo Processo de Redução de Patógenos e da Atratividade de

Vetores” (PRPAV) e pelo “Processo para a Redução Significativa de Patógenos” (PRSP). Para ser classificado como “Tipo A” o lodo deve passar, além dos processos anteriormente descritos, pelo “Processo de Redução Adicional de Patógenos” (PRAP). Este processo é determinado pela manutenção da temperatura da biomassa em valores acima de 55°C por um período mínimo de três dias.

Para a aplicação do lodo de esgoto na agricultura, além de passar pelos processos anteriormente explicados, é indispensável que suas características microbiológicas não sejam prejudiciais ao ambiente. Desta forma, na seção III do Artigo 11 da Resolução 375/06, ficam determinados os “requisitos mínimos de qualidade do lodo de esgoto ou produto derivado destinado à agricultura”. Na Tabela 5 estão citados os valores máximos de patógenos tolerados pela legislação para cada tipo de lodo ou produto derivado.

Tabela 5 - Classificação de lodo de esgoto ou produto derivado de acordo com a Resolução 375/06 e as concentrações de patógenos toleradas

Tipo de lodo ou produto derivado	Concentração de patógenos	Uso
A	Coliformes Termotolerantes <math><10^3</math> NMP/g de ST Ovos viáveis de helmintos <math><0,25</math> ovo/g de ST <i>Salmonella</i> ausência em 10g de ST Vírus <math><0,25</math> UFP ou UFF/g de ST	Fruticultura, silvicultura, produção de óleos e fibras
B	Coliformes Termotolerantes <math><10^6</math> NMP/g de ST Ovos viáveis de helmintos <math><10</math> ovos/g de ST	Silvicultura, produção de óleos e fibras

Observa-se que, além das diferenças quantitativas em relação a coliformes termotolerantes e a ovos viáveis de helmintos, apenas no caso do produto “Tipo A” existe uma preocupação em relação às quantidades de *Salmonella* e de vírus.

A classificação do lodo de esgoto ou derivados tem como objetivo impedir o seu uso inadequado, sendo que a resolução 375/06 atribui algumas restrições a este material.

Em relação ao lodo classificado como Tipo B, o artigo 14 coloca que “A utilização de lodo de esgoto ou produto derivado enquadrado como classe B é restrita ao cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, com a aplicação mecanizada, em sulcos ou covas, seguida de incorporação”. Segundo o artigo 12, inciso XI.

“para o uso de lodo de esgoto ou produto derivado classe B, tomar medidas adequadas para restringir o acesso do público às áreas de aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado, durante um período de 12 meses após a última aplicação. Estas medidas devem necessariamente, incluir a colocação de sinalização indicando as atividades que estão sendo realizadas em cada local”.

Outras restrições à utilização de lodo de esgoto na agricultura podem ser observadas nos artigos 12 e 15 desta Resolução. Estes artigos restritivos fazem as seguintes ponderações:

Art. 12. É proibida a utilização de **qualquer classe** de lodo de esgoto ou produto derivado em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, e culturas inundadas, bem como as demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo.

I - Em solos onde for aplicado lodo de esgoto ou produto derivado, as pastagens poderão ser implantadas após um período mínimo de 24 meses da última aplicação.

II - Em solos onde for aplicado lodo de esgoto ou produto derivado, somente poderão ser cultivadas olerícolas, tubérculos, raízes ou demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo, bem como culturas inundáveis, após um período mínimo de 48 meses da última aplicação.

Art. 15. Não será permitida a aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado:

I - Em unidades de conservação, com exceção das Áreas de Proteção Ambiental-APA;

II - Em Área de Preservação Permanente-APP;

III - Em Áreas de Proteção aos Mananciais-APMs definidas por legislações estaduais e municipais e

em outras áreas de captação de água para abastecimento público, a critério do órgão ambiental competente;

IV - No interior da Zona de Transporte para fontes de águas minerais, balneários e estâncias de águas minerais e potáveis de mesa, definidos na Portaria DNPM no 231, de 1998;

V - Num raio mínimo de 100 m de poços rasos e residências, podendo este limite ser ampliado para garantir que não ocorram incômodos à vizinhança;

VI - Numa distância mínima de 15 (quinze) metros de vias de domínio público e drenos interceptadores e divisores de águas superficiais de jusante e de trincheiras drenantes de águas subterrâneas e superficiais;

VII - Em área agrícola cuja declividade das parcelas ultrapasse:

a) 10% no caso de aplicação superficial sem incorporação;

b) 15% no caso de aplicação superficial com incorporação;

c) 18% no caso de aplicação subsuperficial e em sulcos, e no caso de aplicação superficial sem incorporação em áreas para produção florestal;

d) 25% no caso de aplicação em covas;

VIII - Em parcelas com solos com menos de 50 cm de espessura até o horizonte C;

IX - Em áreas onde a profundidade do nível do aquífero freático seja inferior a 1,5 m na cota mais baixa do terreno;

X - Em áreas agrícolas definidas como não adequadas por decisão motivada dos órgãos ambientais e de agricultura competentes.

§ 1º O lodo de esgoto ou produto derivado poderão ser utilizados na zona de amortecimento de unidades de conservação, desde que sejam respeitados as restrições e os cuidados de aplicação previstas nesta Resolução, bem como restrições previstas no Plano de Manejo, mediante prévia autorização do órgão responsável pela administração da unidade de conservação.

§ 2º No caso da identificação de qualquer efeito

adverso decorrente da aplicação de lodos de esgoto ou produto derivado realizada em conformidade com esta Resolução, e com vistas a proteger a saúde humana e o ambiente, as autoridades competentes deverão estabelecer, imediatamente após a mencionada identificação, requisitos complementares aos padrões e critérios insertos nesta Resolução.

Em síntese, os compostos orgânicos a base de lodo de esgoto podem, a partir da Resolução 375/06, atingir a classificação como Tipo A ou como Tipo B, de acordo com a temperatura e tempo de exposição alcançada na compostagem, bem como a partir da caracterização patogênica do mesmo, resultando um produto com maior segurança sanitária, e menor restrição de uso na agricultura, conforme tabela abaixo:

Tabela 6 - Requisitos para classificação de lodos de esgoto ou produtos derivados conforme a Resolução 375/06

Parâmetro	Tipo A	Tipo B
PRSP- Temperatura acima de 40° C por 5 dias com ocorrência de um pico de 55° C	X	X
PRAV- Temperatura acima de 40° C por 14 dias sendo a média maior que 45° C	X	X
PRAP- Temperatura acima de 55° C por 3 dias	X	
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
<i>Salmonella</i>	Ausência em 10g de ST	Não é necessário
Vírus	< 0,25 UFP ou UFF/g de ST	Não é necessário

Após a possível classificação do material como Tipo A, existe a possibilidade de se produzir um fertilizante orgânico ou um condicionador de solo a partir deste material, sendo a Instrução Normativa 27/06 (BRASIL, 2006b) do MAPA (Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento) responsável pela definição dos limites microbiológicos, parasitológicos e químicos máximos para tal classificação.

Tabela 7 - Limites máximos de contaminantes admitidos em Fertilizantes Orgânicos e condicionadores de solo conforme IN 27/06

Contaminante	Valor máximo admitido
Coliformes termotolerantes- Número mais provável por grama de matéria seca (NMP/g de MS)	1000,00
Ovos viáveis de helmintos- Número por quatro gramas de sólidos totais	1,00
<i>Salmonella</i> SP	Ausência em 10g de matéria seca

Fonte: IN 27/06 do MAPA

Importante observar que as quantidades máximas permitidas de contaminantes em fertilizante orgânico é a mesma (exceto pela exclusão do item Vírus) do proposto na Resolução 375/06 do CONAMA para lodos de esgoto Tipo A.

3.4.3. Elementos inorgânicos

Para proporcionar maior segurança na aplicação de biossólidos na agricultura, a Resolução 375/06 do CONAMA, na seção III artigo 11, determina os “requisitos mínimos de qualidade do lodo de esgoto ou produto derivado destinado à agricultura”, sendo as substâncias inorgânicas um dos fatores limitantes. Esta mesma preocupação também ocorre para a IN 27/06, que, em seu anexo V, determina os limites máximos de elementos inorgânicos para caracterizar um material como fertilizante orgânico, e no anexo IV, determina os limites máximos de elementos inorgânicos para caracterizar um material como condicionador de solos, sendo esta legislação mais restritiva que a Resolução 375/06. Estes limites podem ser observados na tabela abaixo.

Tabela 8 - Concentração máxima permitida de substâncias inorgânicas no lodo de esgoto ou produtos derivados conforme Resolução 375/06 e IN 27/06

Substâncias Inorgânicas	Concentração máxima permitida em fertilizantes orgânicos - IN 27/06 (mg/kg de matéria seca)	Concentração máxima permitida em condicionadores de solo - IN 27/06 (mg/kg de matéria seca)	Concentração máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado Resolução 375/06 (mg/kg de matéria seca)
Arsênio	20	20	41
Bário			1300
Cádmio	3	8	39
Chumbo	150	300	300
Cobre			1500
Cromo	200	500	1000
Mercúrio	1	2,5	17
Molibdênio			50
Níquel	70	175	420
Selênio	80	80	100
Zinco			2800

Além destas legislações nacionais, têm-se as legislações regionais que determinam critérios para a utilização do biossólido em solos agrícolas. São exemplos os estados de São Paulo, do Paraná e o Distrito Federal. No caso de São Paulo, a CETESB, companhia responsável pela coleta e tratamento do esgoto, tem uma legislação mais restritiva que a lei americana, na qual, como anteriormente descrito, se baseia a legislação brasileira. (SANTOS, 2010). No estado de Santa Catarina não

existe nenhuma regulamentação para uso do lodo, desta forma deve-se considerar a legislação nacional.

No mundo, vários países já adotaram critérios para o controle da aplicação de bio sólido na agricultura. As restrições ambientais são mais rígidas na comunidade européia do que na americana, especialmente em relação às quantidades de metais pesados. Os parâmetros internacionais devem servir de referência, entretanto devem-se fazer muitas pesquisas de campo para inferir sobre a especificidade das relações solo-clima-bio sólido às condições brasileiras (BOEIRA & MAXIMILIANO, 2006).

4. METODOLOGIA

4.1. Caracterização do lodo da ETE Insular

4.1.1. Coleta e armazenamento das amostras

Amostras de lodo de esgoto foram coletadas diretamente do desaguador, que o destinaria ao aterro sanitário de Biguaçu. Ao todo foram realizadas 3 coletas completas, (análise de todos os parâmetros estabelecidos pela legislação) nos dias 11/04, 12/07 e 05/11, e três outras coletas parciais, nos dias 09/02, 16/06 e 15/07³. Foram coletadas 500g de lodo em cada uma das amostras. Imediatamente o material foi condicionado em caixas de isopor de 100 l, coberto com gelo e enviado por Sedex para o Laboratório de solos e Fertilizantes Orgânicos da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC).

As amostras para análises microbiológicas e parasitológicas (experimento 5) foram retiradas diretamente do caminhão tanque no dia 7 de julho de 2011. As amostras do composto após a compostagem foi feita da seguinte forma: foram retiradas cinco sub-amostras em pontos distintos da leira, a uma profundidade de 25 centímetros. Estas subamostras foram misturadas em um balde esterilizado, de onde se obteve a amostra que foi levada ao Laboratório de análise. Este procedimento foi repetido cinco vezes, de onde se obtiveram as cinco amostras do experimento. Este procedimento também foi realizado para a análise de vírus, sendo o numero de amostras igual a 3.

4.1.2. Metodologia das análises físicas e químicas

A caracterização do lodo de ETE foi realizada a partir de Silva (1982) com pequenas alterações, e está de acordo com a Resolução n°375/2006 do CONAMA (BRASIL, 2006). Os parâmetros físico-químicos analisados estão descritos na tabela abaixo:

³ Nas amostras completas foram analisados **todos** os parâmetros indicados na Tabela 9 enquanto que nas coletas parciais apenas uma parte dos mesmos foi avaliada. Os números que estão na tabela após o parâmetro indicam o numero de amostras analisada.

Tabela 9 - Metodologia para determinação das características físico-químicas do lodo da ETE Insular

Parâmetro	Método Analítico
pH em CaCl ₂ ³	Potenciométrico
Teor de sólidos totais (%) ³	Gravimétrico
Teor de sólidos fixos (% ST) ³	
Teor de sólidos voláteis (%ST) ¹	
Enxofre (S) Total (%) ¹	Gravimétrico- BaCl ₂
CTC (Cmol/kg) ¹	Titulométrico- NaOH
Carbono Orgânico (%) ²	Titulométrico- oxidação- K ₂ Cr ₂ O ₇
Matéria Orgânica (%) ²	Titulométrico- oxidação- K ₂ Cr ₂ O ₇
Nitrogênio Total (%) ²	Titulométrico- Liga de Raney
Nitrogênio Amoniacal (%) ²	Titulométrico- NaOH
Nitrogênio nítrico/nitrato (%) ¹	Titulométrico- Liga Devarda
Fósforo (P ₂ O ₅) Total (%) ²	Gravimétrico- Quimiciac
Potássio (K ₂ O) sol de água.(%) ¹	Espectrofotometria de absorção atômica- Chama
Alumínio (Al) (%) ³	
Cálcio (Ca) (%) ³	
Magnésio (Mg) (%) ²	
Molibdênio (Mo) (%) ²	
Cobre (Cu) (%) ³	
Sódio (Na) (%) ¹	
Zinco (Zn) (%) ³	
Arsênio (Ar) (%) ²	
Bário (Ba) (%) ²	
Cádmio (Cd) (%) ³	
Chumbo (Pb) (%) ³	
Cromo (Cr) (%) ³	
Mercurio (Hg) (%) ²	

Níquel (Ni) (%) ²	Espectrofotometria de absorção atômica- Chama
Selênio (Se) (%) ²	
Umidade a 65° C (%) ⁴	Gravimétrico
Umidade a 105° C (%) ⁴	Gravimétrico

¹ Resultados obtidos a partir de 3 amostras; ² Resultados obtidos a partir de 4 amostras; ³ Resultados obtidos a partir de 5 amostras; ⁴ resultados obtidos a partir de 6 amostras.

A análise da umidade e dos teores de sólidos totais, sólidos voláteis e de sólidos fixos foi feita a partir de métodos gravimétricos. Para a umidade e o teor de sólidos totais utilizou-se estufa a 65° C, enquanto que para a determinação dos teores de sólidos fixos e de sólidos voláteis utilizou-se estufa à 105°C. Na análise de enxofre (S) total também se utilizou o método gravimétrico com BaCl₂.

Para a determinação do carbono orgânico e da matéria orgânica foi aplicado o método de oxidação por dicromato em meio ácido com titulação (TEDESCO et al., 1995); para o nitrogênio total, o nitrogênio amoniacal e o nitrogênio nítrico/nitrato utilizou-se o método de digestão, destilação a vapor e titulação (TEDESCO et al., 1995); para o nitrogênio amoniacal, a titulação foi feita com NaOH. Para carbono orgânico e matéria orgânica a titulação foi feita com K₂Cr₂O₇ e para o nitrogênio total utilizou-se a Liga de Raney.

Na análise dos teores de fósforo total (P₂O₅), utilizou-se a análise gravimétrica pelo “Método do Quimociac”, dividido em: digestão, precipitação pelo reagente quimociac, separação, secagem, pesagem e cálculo.

A determinação dos teores de K₂O em solução de água, Al, Ca, Mg, Mo, Cu, Na, Zn, As, Ba, Cd, Pb, Cr, Hg, Ni e Se foi efetuada com o método analítico da espectrofotometria de absorção atômica com chama de ar-acetileno. Por fim para analisar o pH do lodo em CaCl₂, utilizou-se o método analítico potenciométrico.

4.2. Experimentos para determinação de misturas e cargas para a compostagem de lodo de ETE e análises microbiológicas e parasitológicas antes e após a compostagem

4.2.1. Experimentos 1 e 2 - Determinação de mistura

Os experimentos para determinação da mistura a ser adicionada ao lodo ETE foram conduzidas no Pátio Central da compostagem da Universidade Federal de Santa Catarina (27° 35'50"S, 48° 30'55"L). O delineamento experimental utilizado foi o de Blocos Completos Casualizados com quatro blocos ao longo do tempo.

No primeiro experimento, conduzido entre os 02/02/11 e 12/04/11 foram testadas três misturas: Lodo de ETE/inoculante/estruturante (LIE 60), Lodo de ETE/inoculante (LI) e apenas Lodo de ETE (L) (Ver Tabela 10).

No segundo experimento, realizado entre os dias 08/03/11 e 07/07/11 foram testadas as seguintes misturas: Lodo de ETE/inoculante e estruturante (LIE 60), Lodo de ETE e estruturante (LE) e apenas Lodo (Tabela 10).

O acompanhamento de temperaturas foi feito com termômetros Columbus de haste bimetálica de 20 cm e 60 cm.

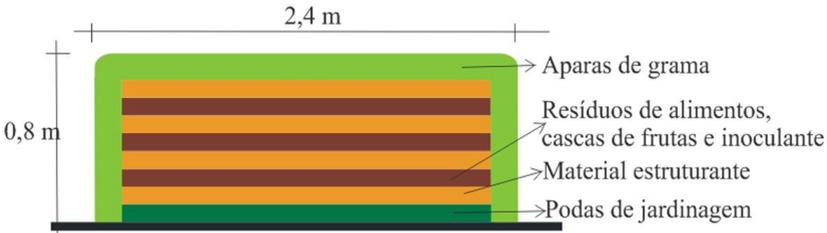
Tabela 10 - Composição dos tratamentos em cada experimento

Experimento						Nome	Carga lodo	Inoculante	Estruturante
1	2	3	4	5	6				
X	X		X			L	60 kg/m ²		
X						LI	60 kg/m ²	33 l/m ²	3,5 kg/m ²
	X					LE	60 Kg/m ²		3,5 kg/m ²
		X				LIE 40	40 kg/m ²	33 l/m ²	3,5 kg/m ²
X	X	X	X	X	X	LIE 60	60 kg/m ²	33 l/m ²	3,5 kg/m ²
		X				LIE 80	80 kg/m ²	33 l/m ²	3,5 kg/m ²
			X			LIE 90	90 kg/m ²	33 l/m ²	3,5 kg/m ²
			X			LIE 120	120 kg/m ²	33 l/m ²	3,5 kg/m ²

A leira de compostagem foi elaborada seguindo a metodologia de leiras estáticas com aeração natural desenvolvida por Inácio & Miller (2009). Na confecção das bordas e coberturas das leiras foram utilizadas aparas de grama provenientes da manutenção do *campus* central da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A maravalha, aplicada como material estruturante e isolante térmico foi fornecida pelos Departamentos de Farmácia e Biologia da UFSC, tendo sido empregada anteriormente para a criação de roedores. Os Resíduos de Alimentos Cozidos e Cascas de Frutas (RACCaF) procederam do Restaurante Universitário e constituíram a biomassa cuja rápida degradação resulta em altas temperaturas. A inoculação biológica foi feita com composto em sua fase inicial de maturação e teve como função acelerar o processo de compostagem pelo aumento da população inicial de microorganismos responsáveis pela degradação.

Com formato retangular e dimensões de 6,0m x 2,4m, a leira ocupou uma área de 14,4 m². As bordas, ou moldura, foram montadas com 25 cm de largura e 60 cm de altura. Seu interior foi preenchido com os seguintes materiais: podas de jardinagem; maravalha (50 l), restos de alimentos cozidos e cascas de frutas (700 kg) inoculados biologicamente com composto em início de maturação; e novamente uma camada (50 l) de maravalha. Para a cobertura foi disposta uma camada de 20 cm de aparas de grama. (Figura 6) Este procedimento foi repetido por três vezes, até serem registradas temperaturas acima de 60°C. A cada repetição, a cobertura de aparas de grama da aplicação anterior foi arrastada para as bordas, transformando-se na parede da aplicação subsequente e, com o auxílio de um garfo agrícola foi feita a mistura da nova biomassa (inoculação) incorporada àquela em estágio adiantado de decomposição com objetivo de diminuir o tempo para obtenção de temperaturas acima dos 60°C.

Figura 6 - Corte transversal esquemático com a distribuição dos materiais para aquecimento da leira antes da incorporação do lodo bruto



Fonte: Desenho do autor

A partir de então procedeu a aplicação das misturas lodo de ETE, seguindo os mesmos procedimentos descritos para a compostagem do RACCaf, exceto por não haver a mistura da nova biomassa à biomassa já em decomposição (inoculação), sendo realizado somente o despejo do biossólido sobre a leira aquecida. Em cada tratamento (Tabela 10) foram consumidos 210 kg de lodo de ETE, ocupando uma área de 3,6m² (1,5 x 2,4m), havendo entre os tratamentos uma bordadura de 0,5m. Os constituintes da mistura de cada tratamento foram depositados sobre o biossólido e homogeneizados com auxílio do garfo agrícola. A cobertura com maravalha e aparas de grama procedeu como já descrito nos procedimentos anteriores.

As temperaturas da biomassa foram medidas durante seis dias consecutivos, com auxílio de termômetro com haste bimetálica de 25 cm, introduzido aleatoriamente na mistura em seis pontos distintos para cada tratamento, para geração de um dado de média diário. O período de monitoramento foi determinado considerando os requisitos para PRSP, PRAP e PRAV e realizados a cada bloco.

Após seis dias de acompanhamento foi adicionada à leira nova camada de RACCaf (60,0kg/m²) e de material estruturante (3,5kg/m²) para homogeneização das temperaturas dos tratamentos acima de 60°C e preparo para confecção de um novo bloco.

Após a coleta de temperaturas foram feitas as análises estatísticas utilizando o teste de separação de médias, seguido pelo Teste de Tukey, com nível de significância de 5%.

4.2.2. Experimentos 3 e 4 - Determinação da carga máxima

Nestes dois experimentos, buscou-se determinar as cargas máximas de lodo a ser utilizado em leiras estáticas com aeração natural, sem que houvesse redução da temperatura e/ou perda de estrutura da leira. (Tabela 10).

O Experimento 3 foi realizado entre os dias 2 de março e 23 de maio de 2011 na “Fazenda Aterrada”, localizada no bairro do Itacorubi, em Florianópolis. A mistura utilizada foi a LIE 60 (Lodo de ETE/inoculante e estruturante), uma vez que demonstrou os melhores resultados no 1º Experimento. O delineamento experimental utilizado foi o de Blocos Completos Casualizados com quatro repetições ao longo do tempo e três tratamentos: 40 kg/m², 60 kg/m² e 80 kg/m².

O Experimento 4 foi conduzido no pátio central de compostagem da Universidade Federal de Santa Catarina (27° 35'50”S, 48° 30'55”L) entre os dias 07/05/11 e 15/07/11 e também utilizou a mistura LIE 60.

O delineamento experimental utilizado foi o de Blocos Completos Casualizados com quatro repetições ao longo do tempo e três tratamentos: 60 kg/m², 90 kg/m² e 120 kg/m². O acompanhamento de temperaturas foi feito com termômetros de haste bimetalica de 20 cm e 60 cm.

4.2.3. Experimento 5 - Análise microbiológica e parasitológica em amostras de lodo de ETE e de lodo compostado

4.2.3.1. Confecção da leira

Foi elaborada uma nova leira utilizando o tratamento LIE 60, com 4 m² de área e seguindo a metodologia de Inácio & Miller (2009), sendo que a aplicação da mistura do biossólido ocorreu com a leira em fase termofílica, após três aplicações de RACCaf (como descrito anteriormente).

Foram retiradas cinco amostras do lodo bruto e cinco amostras do lodo após passar 20 dias na leira em condições termofílicas.

Para a determinação de coliformes totais e termotolerantes a metodologia é baseada na “Técnica da fermentação em tubos múltiplos” proposta por Eaton et al. (2005).

Para *Salmonella*, a metodologia foi baseada em Andraus (1998), que consiste na inoculação em diferentes ágar, para separar e

distinguir as colônias de *Salmonella sp.* das demais enterobactérias. Importante destacar que esta metodologia para detecção de *Salmonella* estipula os resultados apenas de forma qualitativa (presença/ausência).

Para a quantificação de ovos viáveis de helmintos utilizou-se a metodologia proposta por WHO (2004) que consiste na sedimentação da amostra por “*over night*”, seguido de uma centrifugação por 15 minutos, e utilização do aceto-acido como tampão seguido da flotação por sulfato de zinco 33% e por fim um cálculo para determinar o numero de ovos por grama.

4.2.4. Experimento 6 - Detecção viral em amostras de lodo de ETE e em composto de lodo

Para avaliar a eficiência da compostagem para eliminação de genomas de adenovírus e viabilidade dos mesmos foram elaboradas duas novas leiras com 4,5m² de área cada utilizando a metodologia desenvolvida por Inácio & Miller (2009). A mistura utilizada foi a LIE, com carga de 60 kg/m².

Três tratamentos foram utilizados: testemunha (lodo bruto), lodo submetido à compostagem a 60°C por seis dias e lodo submetido à compostagem a 70° por três dias.

A metodologia utilizada para quantificação dos genomas virais é a Polymerase Chain Reaction (PCR), que é baseada em três passos principais: Eluição viral, concentração viral e detecção viral.

Para a eluição viral utilizou-se o “Método tampão glicina” descrito por Gimenez et al. (2006) com modificações. O segundo passo, denominado de concentração viral, é baseado no método proposto por Lewis e MetCalf (1988) com algumas alterações. Por fim, a detecção viral foi realizada utilizando o método descrito por Hernhot (2002) utilizando o PCR em tempo real como forma de quantificar o número de partículas virais (cópias do genoma) das amostras.

Para inferirmos sobre a viabilidade viral foi utilizada a metodologia da Polymerase Chain Reaction (PCR) em tempo real integrada a cultura celular (ICC-PCR), descrita por Hernhot (2002).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Características físico-químicas do lodo da ETE Insular

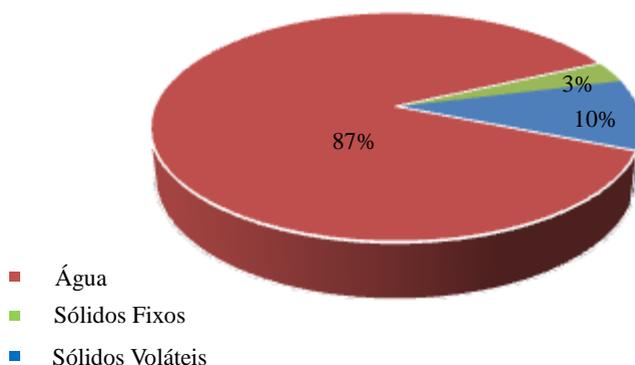
5.1.1. Umidade, sólidos fixos, sólidos voláteis e matéria orgânica

O lodo da ETE insular apresentou altos valores de umidade, com média das seis amostras de 87,30% (Gráfico 2) e o desvio padrão de 1,04%. Este comportamento é comum em lodo de ETE (GONÇALVES et al., 2010; EPSTEIN, 2002).

A média dos valores de sólidos totais foi de 12,70%, dos quais 76,45% são voláteis e 23,52% são fixos (Gráfico 2).

A partir destes resultados pode-se concluir que se trata de um lodo muito instável, com alta concentração de matéria orgânica. O que significa que se for utilizado na agricultura necessita de uma estabilização prévia, sendo a compostagem uma das possibilidades.

Gráfico 2 - Umidade, sólidos fixos, sólidos voláteis em lodo de ETE



Pode-se observar altas quantidades de matéria orgânica (Tabela 11) no lodo, sendo estas extremamente benéficas se o mesmo for utilizado como condicionador do solo, tendo em vista sua importância na melhoria das características físicas do solo, e como estoque de nutrientes, uma vez que tem a capacidade de liberar gradualmente os nutrientes para a solução do solo, de forma que as perdas de nutrientes

são minimizadas (GAMA-RODRIGUES & GAMA RODRIGUES, 2008). Outro benefício da matéria orgânica no solo é que esta atua como biorremediador de moléculas contaminantes, como as substâncias inorgânicas, resíduos de agrotóxicos, entre outros, pois estes elementos ficam adsorvidos em quelatos, e, portanto indisponíveis às plantas, permanecendo imóveis no solo (EPSTEIN, 2002).

Tabela 11 - Características físicas e químicas do lodo de esgoto da ETE Insular

Parâmetro	Média	N	Desvio Padrão (S)
pH	6,67	5	0,52
Teor de sólidos totais (%)	12,70	5	0,76
Sólidos fixos (% dos ST)	23,52	5	4,29
Sólidos voláteis (% dos ST)	76,45	5	4,29
Enxofre (S) (% MS)	0,42	3	0,06
CTC ⁴ (cmol _c / kg)	579,6	3	50,52
Carbono Orgânico (% MS)	37,11	4	3,81
Matéria Orgânica (% MS)	63,87	4	6,53
N total (% MS)	6,0	4	1,02
N amoniacal (% MS)	1,32	4	0,33
N Nitrito/nitrato (% MS)	1,04	3	0,82
Fósforo Total – P ₂ O ₅ (% MS)	2,27	4	0,47
Potássio - K ₂ O (% MS)	0,31	3	0,04
Alumínio (Al) (% MS)	0,99	5	0,44
Cálcio (Ca) (% MS)	0,99	5	0,16
Magnésio (Mg) (% MS)	0,43	4	0,23
Umidade 65°C (%)	86,32	6	1,04
Umidade 105°C (%)	87,23	6	0,7

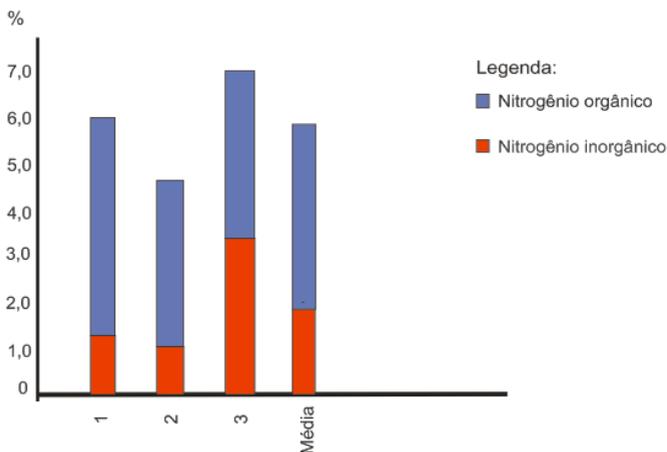
5.1.2. Nitrogênio, pH e relação C/N

O lodo da ETE Insular apresentou valores médios de nitrogênio total (nitrogênio orgânico + nitrogênio inorgânico) de 6% (Gráfico 3), todavia este nutriente não se encontra totalmente em formas

⁴ Capacidade de Troca Catiônica

estabilizadas.

Gráfico 3 - Nitrogênio orgânico e nitrogênio inorgânico (% da MS)



Como o pH do lodo em média é de 6,67, as quantidades de amônia liberadas são baixas (MELO, 1978). Além disto, em leiras de compostagem onde a relação C/N seja próxima a 30/1, o nitrogênio é estabilizado na forma de biomassa microbiana, e posteriormente em húmus, evitando suas perdas (INÁCIO & MILLER, 2009). Fato este que não ocorre em aterros sanitários.

A relação C/N do lodo da ETE se encontrou na faixa de 4,8 -7,5, o que é muito baixo para um eficiente processo de compostagem (EPSTEIN, 2002). Desta forma, é imprescindível que a compostagem do biossólido seja realizada atrelada a algum material com alta relação C/N, de forma que a mistura apresente condições favoráveis ao processo.

Em síntese, além de evitar perdas de N e conseqüentemente contaminação ambiental, a compostagem e posterior utilização agrícola do lodo de ETE está relacionado à diminuição da necessidade de produção de fertilizantes químicos nitrogenados (a uréia, por exemplo), que não promovem a ciclagem de nutrientes e utilizam muita energia. A produção de fertilizantes nitrogenados também é um dos principais responsáveis pela produção de óxido nitroso, que segundo Ravishankara et al. (2009) é o gás com maior potencial de destruição da camada de

ozônio Desta forma, é imprescindível que se pesquise formas de reutilizar o nitrogênio exportado pelas culturas agrícolas, sendo o uso agrícola dos lodos de ETE uma destas alternativas.

5.1.3. Macronutrientes

O lodo é uma fonte expressiva de fósforo, enxofre e cálcio. (Tabela 12). Segundo a SBCS (2004), considerando uma produtividade agrícola de seis toneladas de milho por hectare, ou de três toneladas de girassol ou soja por hectare, ter-se-á uma exportação de aproximadamente 45 kg/ha de P_2O_5 e de 7 kg de enxofre por ciclo. No lodo bruto por tonelada, a quantidade de P_2O_5 é de 2,9 kg e de enxofre é de 0,42kg. Portanto, para repor as exportações destes nutrientes são recomendadas aproximadamente 17 toneladas de lodo/ hectare. Para aplicar estas quantidades de fósforo na forma de adubo formulado seriam necessários 250 kg de superfosfato simples por hectare, o que corresponde a um gasto de aproximadamente R\$ 250,00 por hectare.

A proporção de P_2O_5 e Ca no lodo é de 2,3:1 enquanto que no superfosfato triplo é 3:1. Desta forma observa-se que o lodo pode ser uma importante fonte de cálcio para o solo, elemento este indispensável no crescimento vegetal, sendo que a sua deficiência pode proporcionar baixo pegamento das flores e uma má formação dos grãos (LIMA et al., 2003).

O lodo da ETE Insular apresentou baixas quantidades de potássio, sendo o valor médio igual a 0,31% da MS (Tabela 11) pelo fato deste elemento ser altamente solúvel, sendo perdidos junto à fração líquida da ETE (GIACOMINI et al., 2003).

Pode-se observar, portanto, que atualmente está sendo desperdiçado um produto com grandes quantidades de fósforo, nitrogênio, enxofre e outros nutrientes, e, simultaneamente gastando-se recursos para sua produção e/ou extração. Também se deve considerar os prejuízos ambientais que a “perda” destes nutrientes pode causar ao solo, a água e à atmosfera.

5.1.4. Sódio

Em relação ao sódio, o lodo da ETE apresentou média de 281mg/kg de ST, valor que é similar ao observado por Epstein (2002), que sugeriu o acompanhamento dos teores de Na em solos adubados

com lodo de esgoto, de forma que suas concentrações não sejam prejudiciais à produtividade agrícola. No caso da ETE Insular este valor pode estar relacionado ao consumo de sal de cozinha (NaCl) na alimentação da população produtora deste lodo. Também existe a possibilidade deste ser consequência do fato da ETE Insular estar localizada em uma cidade litorânea, onde o sal marinho por diversas formas possa alcançar os sistemas de captação de esgoto.

5.2. Elementos inorgânicos no lodo da ETE Insular

De forma geral, através dos resultados verifica-se que o lodo de esgoto da ETE Insular da CASAN é um material com baixas quantidades de elementos inorgânicos (Tabela 12). Isto se deve principalmente ao fato deste lodo ser de fonte predominantemente domiciliar, não tendo as possíveis contaminações provenientes de indústrias, que muitas vezes utilizam estes elementos na produção, e que são descartados no esgoto.

Tabela 12 - Elementos inorgânicos no lodo da ETE Insular

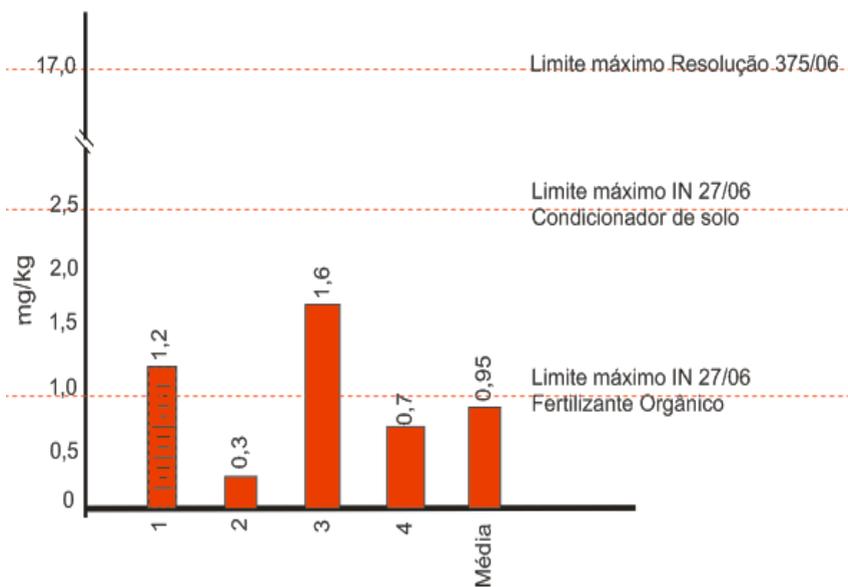
Parâmetro	Média	Desvio Padrão (S)
Molibdênio (Mo) (mg/kg)	9,4	10,1
Cobre (Cu) (mg/kg)	189,8	29,02
Sódio (Na) (mg/kg)	2811	1366
Zinco (Zn) (mg/kg)	521,8	32,42
Arsênio (As) (mg/kg)	2,82	2,9
Bário (Ba) (mg/kg)	147,75	31,08
Cádmio (Cd) (mg/kg)	0,662	0,39
Chumbo (Pb) (mg/kg)	22,64	3,38
Cromo (Cr) (mg/kg)	37,52	28,99
Merúrio (Hg) (mg/kg)	0,95	0,57
Níquel (Ni) (mg/kg)	14,25	1,26
Selênio (Se) (mg/kg)	2,03	2,89

Também se observou que diversas substâncias inorgânicas como o arsênio, o cromo e o selênio, apresentam o desvio padrão muito elevado, o que significa que existem grandes diferenças de concentração nas diferentes amostras. Estes resultados podem ser consequência da

sazonalidade amostral e, portanto, indicam que a quantificação destes deve ser um procedimento padrão na ETE para impedir que um material contaminado possa vir a ser utilizado na agricultura.

O mercúrio (Hg) foi a única substância inorgânica que apresentou quantidades acima do máximo permitido pela legislação para uma possível classificação como Fertilizante orgânico (IN 27/06), entretanto podendo ser classificado como condicionador de solo. Das quatro amostras, duas estavam com valores elevados (Gráfico 4), apesar de ser um lodo de ETE produzido por fontes predominantemente domiciliares.

Gráfico 4 - Mercúrio no lodo da ETE Insular



Como se pode observar no Gráfico 4, as concentrações de mercúrio no lodo estão bem abaixo dos limites para sua utilização segura na agricultura (Resolução 375/06).

A Resolução 375/06 define ainda alguns limites de carga no solo de substâncias inorgânica para uso agrícola do lodo de Esgoto ou produto derivado. No caso do mercúrio, este valor é de 1200g por

hectare. Na amostra mais contaminada, a concentração de mercúrio foi de 1,6 mg/kg de MS ou 0,2 mg/kg de lodo bruto. Para que a carga de mercúrio aplicada pelo lodo alcance 1200g por hectare, seria necessária a aplicação de aproximadamente 6.000 toneladas de lodo em um hectare.

Se for considerar uma adubação de 17 toneladas de lodo por ano em uma gleba (calculado baseado nos teores de fósforo), seriam necessários 375 anos para que o acúmulo de mercúrio no solo alcançasse os limites máximos legais. Se esta adubação ocorresse em uma gleba com uso intensivo do solo (dois ciclos anuais) os limites máximos seriam extrapolados após aproximadamente 180 anos de exploração agrícola.

Apesar do lodo de ETE cru apresentar quantidades de mercúrio acima da legislação, ao se fazer um processo de compostagem atrelado à utilização de outros resíduos orgânicos (restos de alimentos, material estruturante e palha), provavelmente se terá uma redução da concentração de mercúrio no produto final a valores que estarão de acordo com a legislação.

Por isto se recomenda um rigoroso monitoramento do produto final, e, caso após a compostagem os resultados ainda indiquem contaminação por mercúrio, os lotes contaminados deverão ter outra destinação que não seja a aplicação agrícola. Também é possível que ao atrelar resíduos orgânicos na compostagem de lodo, o produto final apresente uma melhor qualidade agrônômica, e desta forma as quantidades de aplicação devem ser menores.

A análise de substâncias inorgânicas no lodo de esgoto compostado não foi realizada, uma vez que o produto final ainda não havia completado o seu período de maturação, e, portanto, ainda não estava apto para utilização agrícola. Todavia é imprescindível que seja feita esta análise antes do uso deste material.

Como a remoção de destes elementos no lodo é muito cara e as técnicas pouco desenvolvidas, é imprescindível evitar a contaminação do esgoto por estes elementos, uma vez que tal contaminação pode impedir sua utilização agrícola (PINTO, 2010; LIMA, 2009).

5.3. Experimentos de mistura e carga de lodo de ETE em compostagem “Método UFSC”

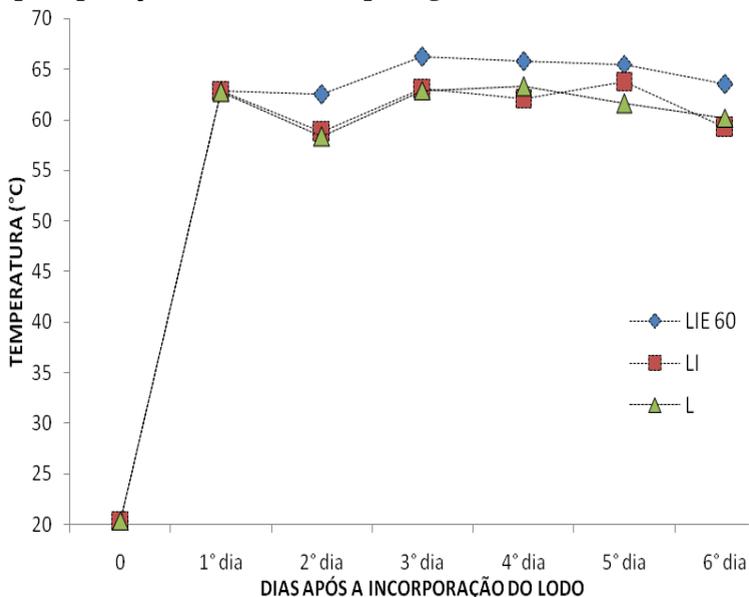
5.3.1. Experimento 1 - Mistura incorporada ao lodo de ETE para compostagem

Para melhor compreensão do gráfico é importante destacar que a temperatura no dia 0 é equivalente à temperatura ambiente do lodo bruto, sendo este incorporado a uma leira que já se encontra em temperaturas termofílicas decorrentes de três aplicações de restos de alimentos e agentes estruturantes, resultando no acréscimo da temperatura do lodo (1º dia, 2º dia etc.).

Os diferentes tratamentos resultaram em médias de temperatura estatisticamente diferentes, sendo que o tratamento LIE 60 se mostrou distinto dos demais com nível de significância de 5%, utilizando o teste de Tukey.

Entretanto, todos os tratamentos alcançaram as temperaturas para satisfazer o PRSP (média acima de 45°C com um pico de três horas acima de 55°C) e o PRAP (3 dias acima dos 55°C). Podendo a compostagem com aeração natural ser enquadrada, a partir destes critérios, como material Tipo A (Gráfico 5).

Gráfico 5 - Média de temperatura do lodo no Experimento 1 após aplicação na leira de compostagem



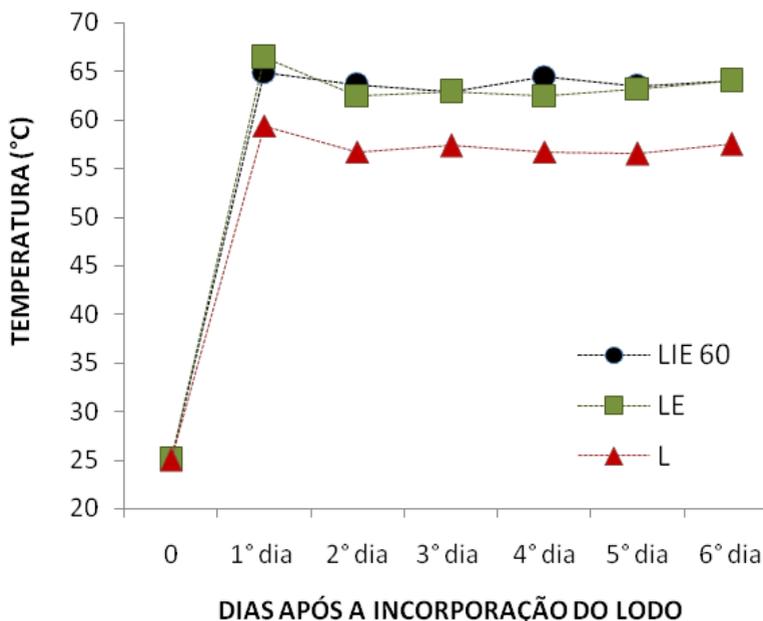
Após o período de 14 dias, as temperaturas médias mantiveram-se acima de 45° C (BIM = 58,8°C; B = 57,5°C; BI = 57,0°C), sem que ocorresse, em todos os tratamentos, registro abaixo de 40°C, cumprindo assim as exigências do PRAV.

5.3.2. Experimento 2 - Mistura a ser incorporada ao lodo de ETE para compostagem

A média de temperatura do tratamento L foi estatisticamente inferior aos demais tratamentos, a partir do teste de Tukey, utilizando um nível de significância de 5%.

Todos os tratamentos alcançaram a temperaturas necessárias para o Processo para Redução Adicional de Patógenos (PRAP) (Gráfico 6).

Gráfico 6 - Média de temperatura do lodo no Experimento 2 após aplicação na leira de compostagem



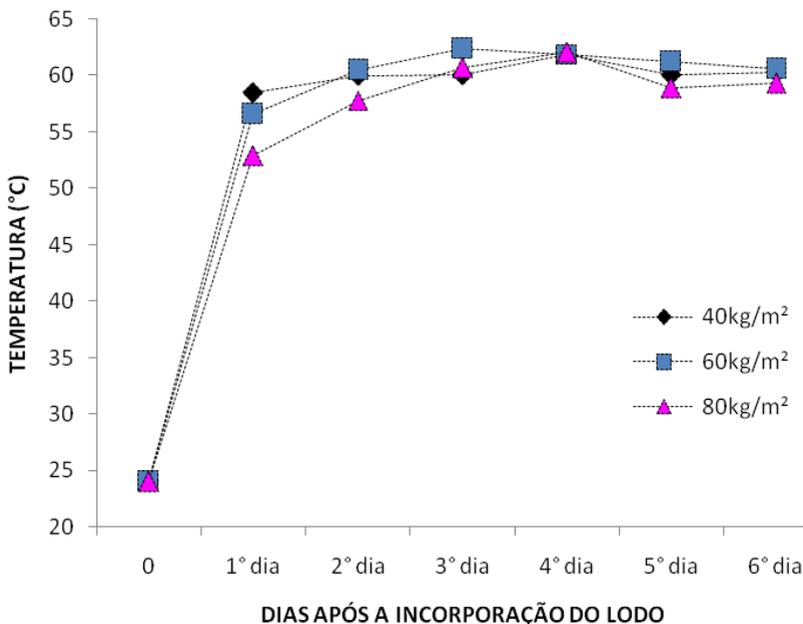
Em todos os tratamentos as temperaturas se mantiveram acima dos 45°C durante os 14 dias de avaliação, e, portanto, todos os tratamentos alcançaram os requisitos necessários para o Processo de Redução da Atratividade de Vetores (PRAV).

A partir destes dois experimentos percebe-se que as altas temperaturas obtidas durante o processo são favorecidas pela ação exclusiva do agente estruturante (tratamentos LIE 60 e LE), uma vez que a presença de materiais de biodegradação lenta e baixa densidade contribuem para a manutenção da porosidade (Manios et al., 2007; Sommer & Möller, 2000), diminuem a umidade do material e a adequação da relação C/N (Inácio & Miller, 2009; Fernandes & Silva, 1999; Epstein 2002). Observou-se também que a utilização do inoculante não proporcionou aumento das temperaturas, provavelmente porque o próprio processo serviu como fonte de inoculante, a partir de uma dinâmica ascendente das camadas inferiores para as superiores.

5.3.3. Experimento 3 - Carga máxima de lodo de ETE em compostagem

Observa-se que nos três diferentes tratamentos conseguiu-se alcançar a temperatura de 55°C por pelo menos três dias consecutivos (Gráfico 7), apesar de não se verificar diferenças significativas entre os tratamentos. Portanto, a compostagem se mostrou eficiente para higienizar até 80 kg de lodo por metro quadrado.

Gráfico 7 - Média de temperatura do lodo no Experimento 3 após aplicação na leira de compostagem



No fim dos 14 dias os tratamentos 40 kg/m² e 60 kg/m² apresentaram temperaturas acima de 50° C, enquanto que o tratamento 80 kg/m² apresentou temperaturas médias acima de 45° C.

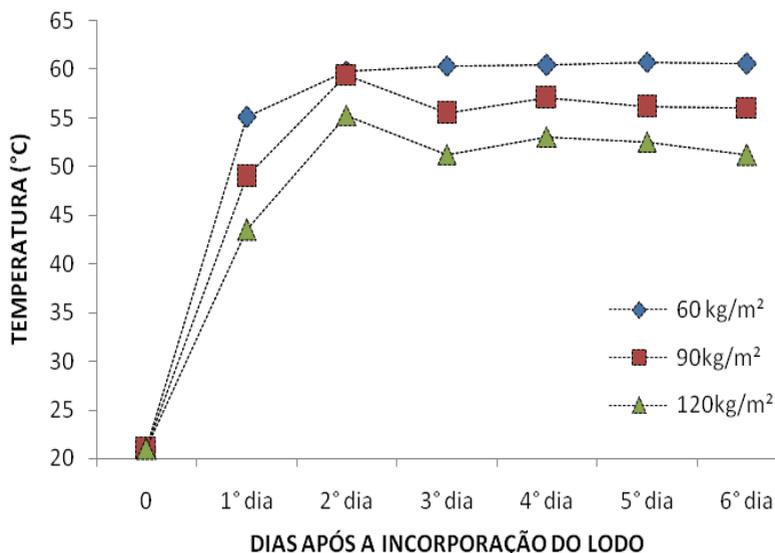
Como em nenhum dos dias observou-se temperaturas abaixo de 40°C os critérios exigidos para o Processo de Redução da Atratividade de Vetores (PRAV) foram alcançados.

Destaca-se ainda que como não foi possível, neste experimento, inferir sobre o limite máximo de aplicação de lodo de esgoto em leiras estáticas com aeração natural, pois como todos os tratamentos obtiveram êxito, iniciou outro experimento com maiores cargas de lodo de esgoto.

5.3.4. Experimento 4 - Carga máxima de lodo de ETE em compostagem

Nota-se que apenas o tratamento 60 kg/m² alcançou temperaturas acima de 55° C, logo no primeiro dia após a aplicação do lodo, permanecendo assim até o 6° dia. O tratamento 90 kg/m² apresentou temperatura acima dos 55° C durante cinco dias, enquanto o tratamento 120 kg/m² ficou abaixo de 55° C em todos os dias avaliados (Gráfico 8), não sendo, portanto, eficiente para a higienização de lodo de esgoto cujo objetivo seja um material Tipo A.

Gráfico 8 - Média de temperatura do lodo no Experimento 4 após aplicação na leira de compostagem



Destaca-se para o tratamento 90 kg/m² que embora, na média dos

blocos, se tenha alcançado as temperaturas e tempo de exposição exigidos pela legislação, no bloco 2 estes valores não foram alcançados.

Neste experimento, ocorreu a ruptura da leira no 1º e o 3º bloco, o que proporcionou o seu desmoronamento. Este fato repetiu-se sempre na parcela em que se encontrava o tratamento 120 kg/m², o que sugere que esta carga não é viável em leiras estáticas com aeração natural. No primeiro bloco foi possível corrigir o problema a partir do manejo, não prejudicando os blocos subseqüentes. Todavia, no 3º bloco a ruptura foi mais intensa e inviabilizou a confecção do 4º bloco e o experimento não pode ser finalizado da forma planejada.

Desse modo, o único tratamento que alcançou todos os critérios exigidos neste experimento foi o de 60 kg/m².

Observa-se, portanto, que o primeiro experimento de cargas demonstrou que, a partir de leiras estáticas com aeração natural, é possível compostar até 80 kg de lodo de ETE /m² de leira sem que haja redução da temperatura a valores abaixo do exigido pela Resolução 375/06 para produção de um material “Tipo A” (três dias acima de 55°C).

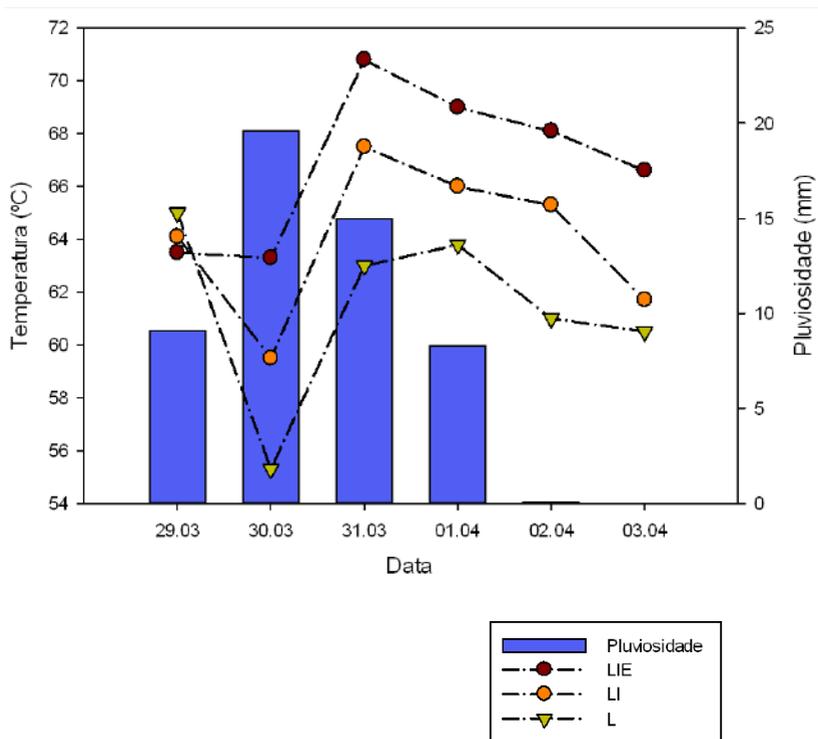
No 2º experimento, observou-se que a carga de 120 kg/m² não foi eficiente para higienizar este material, uma vez que houve perda de estrutura da leira. Além da perda estrutural, o tratamento 120 kg/m² não alcançou a temperatura mínima exigida para higienização de lodo de esgoto no sistema de leiras estáticas com aeração natural. Também o tratamento 90 kg/m² não alcançou as temperaturas mínimas em **todos** os blocos do experimento, o que faz com que o mesmo também não seja recomendado para este fim. Desta forma, recomenda-se, para a metodologia Inácio & Miller (2009) a construção de pátios de compostagem que utilizem a carga de 80 kg de lodo de ETE/m² de leira.

Foi realizado um dimensionamento (ver Apêndice) de um pátio de compostagem para higienização da produção diária do lodo de esgoto da ETE Insular. Foi utilizado o tratamento LIE com cargas de 80 kg/m² de lodo.

Muito importante destacar que a pluviosidade pode ser um fator que proporciona a diminuição das temperaturas das leiras. Apesar deste parâmetro não ter sido avaliado (objeto de pesquisas futuras), observou-se empiricamente esta condição, onde, em algumas datas específicas houve reduções consideráveis da temperatura após longos períodos de chuva, um exemplo deste fenômeno pode ser observado no Gráfico 9. Desta forma talvez seja interessante realizar pesquisas em leiras de

compostagem com cobertura retrátil, uma vez que a cobertura permanente impossibilita a entrada de água, que é fundamental ao desenvolvimento microbiano.

Gráfico 9 - Influência da chuva na temperatura da leira



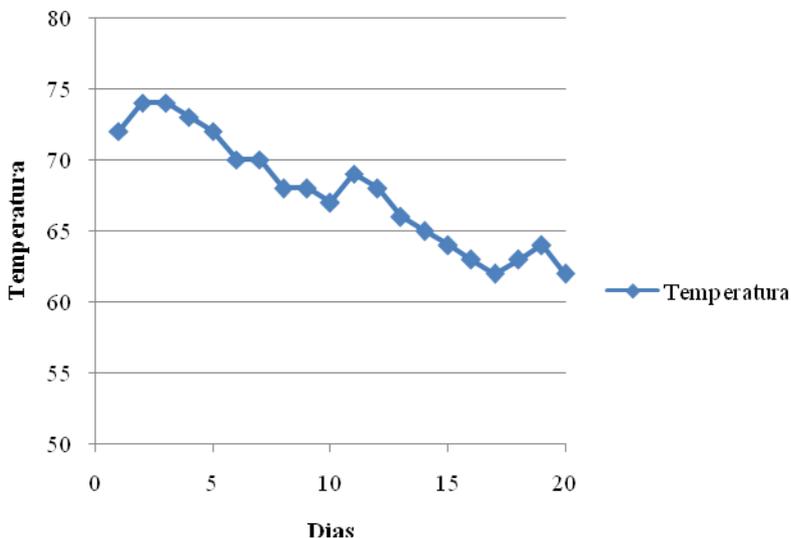
5.4. Avaliação de patógenos em lodo de ETE e a eficiência de higienização pela compostagem

5.4.1. Padrão de temperatura da leira para análises de coliformes termotolerantes, *Salmonella* e ovos viáveis de helmintos

Para inferir sobre a eficiência da compostagem, o mesmo lote de lodo que foi amostrado foi introduzido em uma leira em pleno processo de compostagem termofílica.

A temperatura da leira na qual foi inserido o lodo de esgoto era superior a 70°C, valor este indicado por Epstein (1997) como suficiente para eliminar patógenos, desde que o tempo de exposição seja maior que 60 minutos. No Gráfico 10 apresenta-se o comportamento da temperatura na leira de compostagem ao longo dos 20 dias do processo.

Gráfico 10 - Manutenção da temperatura no interior da leira após a aplicação do biossólido



Observa-se que a média das temperaturas durante os 20 dias de compostagem manteve-se sempre acima dos 60°C, permanecendo acima

de 70°C durante os seis primeiros dias do processo.

5.4.1.1 *Salmonella*

No lodo da ETE Insular o resultado de *Salmonella* nas cinco amostras foi negativo, o que reforça a idéia de que a população da área central de Florianópolis apresenta elevados níveis sanitários. Em países considerados desenvolvidos os resultados estiveram acima deste valor. Na Suécia, Sahlstrom (2003) observou que em 50% das amostras o resultado foi positivo para *Salmonella*. Este mesmo autor cita um trabalho realizado na Noruega em que 10% das amostras deram positivo para *Salmonella*.

Já no lodo compostado, das cinco amostras analisadas uma apresentou resultado positivo. Desta forma, os resultados tornam-se destoantes, uma vez que no material cru não havia contaminação enquanto que no produto compostado observou-se esta contaminação.

Sugere-se que possa ter ocorrido uma contaminação por *Salmonella* posterior ao processo da compostagem, uma vez que as bactérias têm alta capacidade de se multiplicar em ambientes com altas cargas de matéria orgânica (SHIDU et al., 2001). Outra explicação é que o número de amostras analisadas foi pequeno quando comparado com a quantidade de lodo produzida. Desta forma, sugere-se fazer novas amostragens para se dispor de resultados estatisticamente significativos e para que se possa inferir sobre a eficiência da compostagem para eliminar *Salmonella*.

Devido à heterogeneidade da leira de compostagem, pode também ter ocorrido que a amostragem da análise positiva tenha ocorrido em algum ponto em que a temperatura não tenha alcançado as temperaturas termofílicas. Também cabe destacar que o próprio lodo é muito heterogêneo em relação à contaminação, podendo apresentar muita variedade entre as amostras.

Em síntese, ao se comparar os resultados de *Salmonella* com a Resolução 375/06 se observa que o material não pode ser classificado como Tipo A, e nem como um possível fertilizante orgânico, uma vez que em uma das amostras o resultado foi positivo. Entretanto, como para classificar um produto como Tipo B não é necessária a análise de *Salmonella*. Isto torna este material passível de utilização agrícola, desde que se obedeça às restrições de uso para este material.

5.4.1.2. Coliformes termotolerantes

Observa-se no Gráfico 11 A, uma redução abrupta dos valores de coliformes termotolerantes no produto final, estando todas as amostras abaixo dos limites máximos para classificar este material como “Tipo B”. Todavia apesar da significativa redução de coliformes termotolerantes, observou-se que o resultado da média final não é suficiente para que este material seja classificado como “Tipo A” de acordo com a Resolução 375/06 (Gráfico 11B), e tampouco possa ser comercializado como Fertilizante orgânico de acordo com a IN 27/06.

Gráfico 11 A - Coliformes termotolerantes em lodo bruto, lodo após 20 dias na compostagem, e limite máximo para classificação como “Tipo B” de acordo com a Resolução 375/06

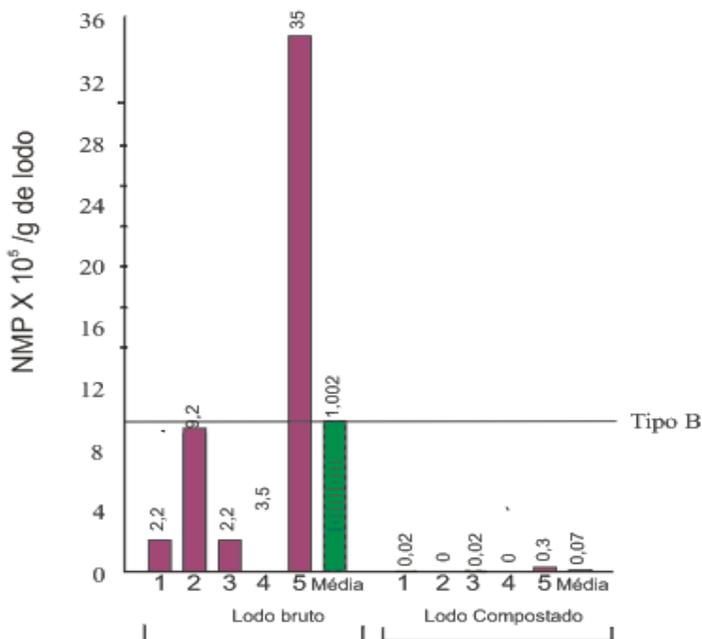
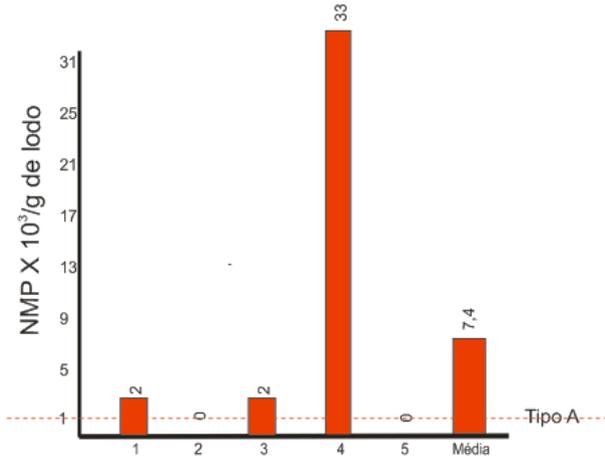


Gráfico 11 B - Coliformes termotolerantes em lodo após 20 dias na compostagem, e limite máximo para classificação como “Tipo A” de acordo com a Resolução 375/06



Por outro lado, ressalta-se que das cinco amostras analisadas duas obtiveram 100% de eliminação (Gráfico 11 B), o que comprova que a compostagem é um método promissor para eliminação deste patógeno, permitindo classificá-lo como Tipo A. Portanto é muito importante que se procure adaptar a compostagem ao lodo de ETE, de forma que se alcance uma eficiência de 100% na eliminação deste patógeno.

Alguns estudos têm apontado que a classificação de coliformes termotolerantes (*Escherichia sp*, *Enterobacter sp*, *Citrobacter sp*, *Klebsiella sp*, entre outros) não é o melhor parâmetro para avaliação de contaminação fecal, visto que nem todos os organismos assim classificados tem origem fecal. Soma-se a isto o fato de compostagem ser um processo termofílico, o que significa que as bactérias atuantes neste processo sejam termotolerantes (mas não de origem fecal), o que pode acarretar resultados falso-positivos e conclusões precipitadas. Atualmente, segundo Michelina et al. (2006) a melhor forma de se avaliar a contaminação fecal é a partir da *Escherichia coli*, uma vez que “é o principal coliforme termotolerante representante de contaminação fecal”, cujos resultados podem ser mais conclusivos para avaliação deste tipo de contaminação.

Em síntese, a compostagem possibilitou que o lodo de esgoto da

ETE Insular fosse classificado como “Tipo B”, e, portanto comprova ser um produto seguro para aplicação agrícola, desde que respeitadas as restrições legais para utilização deste tipo de material. A compostagem também pode ser considerada uma tecnologia promissora para a eliminação de 100% dos coliformes termotolerantes presentes no lodo.

5.4.1.3. Helmitos

Os resultados de ovos viáveis de helmintos em lodo de ETE foram zero em todas as amostras analisadas. Pode-se observar que, mesmo no lodo bruto, a contaminação é baixa, estando inclusive dentro dos limites máximos para caracterizá-lo, conforme a Resolução 375/06, como um produto Tipo A (valores abaixo de 250 ovos viáveis/10³g de sólidos totais).

Estes resultados vão ao encontro do proposto por Aitken et al. (2005) de que a via térmica é a forma mais eficiente de inativação dos helmintos.

5.4.1.3.1. Comparação da quantidade de ovos viáveis de helmintos da ETE Insular com outras ETE's

Observa-se que a quantidade de ovos viáveis de helmintos no lodo de esgoto da ETE Insular está muito abaixo do que aquela das outras ETE pesquisadas (Tabela 13). Este resultado deve ser consequência do elevado nível salutar da população produtora deste lodo, o que acarreta baixos valores de helmintos no lodo.

Tabela 13 - Comparação da quantidade de ovos viáveis de helmintos da ETE Insular com outras ETE's

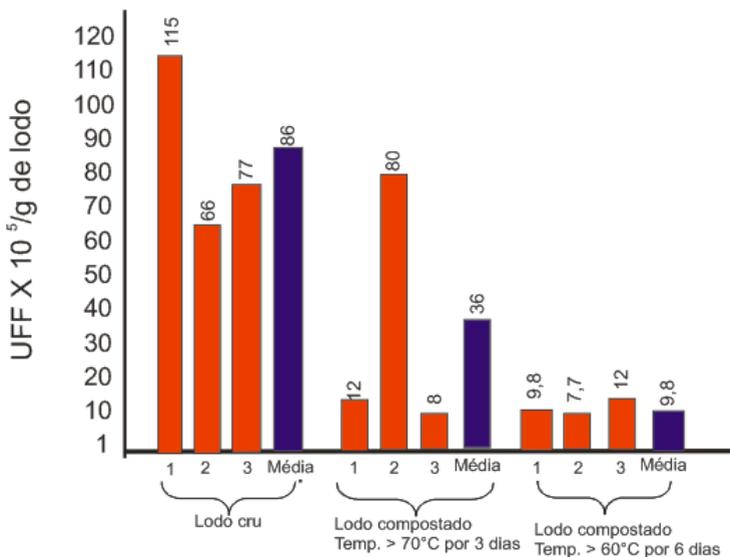
Estação	Ovos viáveis de Helmintos/g ST
ETE Insular	0,0236 ovos viáveis
Sul (DF)	13 ovos viáveis
Belém (PR)	9,02 ovos
RALF (PR)	5,02 ovos viáveis
Lagoa (ES)	4,2 ovos viáveis
Barueri (SP)	0,25 ovos viáveis

Fonte: Andreolli et al. (2010)

5.4.2. Vírus (Adenovírus)

Para os dois tratamentos utilizados (C60 e C70), e para o tratamento testemunha (lodo bruto), os resultados médios foram de $9,83 \times 10^5$, $36,4 \times 10^5$ e $86,2 \times 10^6$ respectivamente. Portanto, nos dois tratamentos, a higienização de lodo de esgoto por compostagem termofílica foi capaz de diminuir as concentrações de genomas virais do lodo (Gráfico 12).

Gráfico 12 - Eficiência da compostagem para eliminação de cópias genômicas de adenovírus



Os resultados da eficiência de higienização de cópias genômicas de adenovírus foram de 89,72% para o material que ficou seis dias acima dos 60°C, e de 59,8% no material que ficou três dias acima de 70°C (Gráfico 16).

A partir da média das amostras, pode-se observar que quanto maior o tempo de exposição a altas temperaturas maior será o consumo de DNA viral no processo

Cabe ressaltar que, para a avaliação da periculosidade da contaminação por este material, o que deve ser levado em conta é a viabilidade destes vírus e não a simples quantificação do genoma viral.

A viabilidade dos adenovírus em amostras de lodo de ETE e nos dois tratamentos de lodo compostado foi igual a zero, confirmando confirma os dados coletados por ARRAJ (2005), que demonstrou que em processos de tratamento de esgoto que produzam lodo ativado ocorre a inativação viral dentro da ETE.

5.4.3. Classificação do lodo compostado de acordo com a Resolução 375/06 e a IN 27/06 a partir dos parâmetros microbiológicos e parasitológicos

A compostagem mostrou-se uma forma eficiente de higienização do lodo de esgoto da ETE Insular, uma vez que transformou um produto inapto à utilização agrícola em um produto “Tipo B”, e que, portanto pode ser utilizado com segurança na agricultura, desde que respeitando as restrições legais (Tabela 14). Esta classificação permite que este produto seja apto para aplicação segura no cultivo do café, na silvicultura e em culturas para a produção de fibras e óleos, como a soja e o girassol.

Tabela 14 - Classificação, de acordo com a Resolução 375/06 e da IN 27/06, do lodo compostado, a partir dos parâmetros microbiológicos e parasitológicos

Parâmetro	Classificação de acordo com a Resolução 375/06 e IN 27/06		
	Tipo A e IN 27/06	Tipo B	Inadequado para utilização agrícola
<i>Salmonella</i>		X	
Coliformes termotolerantes		X	
Ovos viáveis de helmintos	X		
Vírus	X		

Em dois parâmetros os resultados obtidos classificariam o material como “Tipo A”. Para ovos viáveis de helmintos a eficiência de eliminação foi de 100% em todas as amostras analisadas, enquanto para viabilidade de adenovírus o processo de tratamento de esgoto denominado Lodo Ativado foi responsável pela inativação deste patógeno.

Em relação aos coliformes termotolerantes, na média não se conseguiu obter um produto classificável como “Tipo A”. Todavia, em duas das cinco amostras analisadas, a compostagem apresentou uma eficiência de eliminação de 100% deste patógeno.

Em relação à *Salmonella* observou-se que no lodo bruto não

havia contaminação, enquanto que no lodo compostado em uma das cinco amostras se mostrou presente, o que sugere que pode ter ocorrido uma contaminação posterior ao processo. Este resultado também pode ser consequência do baixo número de amostras avaliadas, que pode não ter sido representativa em relação à quantidade de lodo produzida.

Portanto, a partir dos resultados fica nítido que a compostagem é uma tecnologia promissora para tornar, do ponto de vista microbiológico e parasitológico, o lodo de ETE em um produto Tipo “A” de acordo com a Resolução 375/06, e apto à comercialização como fertilizante orgânico de acordo com a In 27/06. Todavia, é fundamental que se aprofundem os estudos sobre a higienização e utilização agrícola do lodo de ETE de forma que se adapte a compostagem às características deste material. Também é muito importante que se façam pesquisas de médio/longo prazo, no sentido de observar os efeitos destas aplicações sobre os recursos hídricos, os solos, os vegetais, os animais e os humanos que de forma direta ou indireta entrem em contato com este material e/ou com os produtos agrícolas resultantes de sua aplicação.

6. CONCLUSÕES

- O lodo da ETE Insular - Casan é uma ótima fonte de nutrientes para a agricultura, devido às quantidades de macronutrientes, destacando-se o nitrogênio (6% da MS) e o fósforo (2,27% da MS), micronutrientes, e matéria orgânica.

- Para o lodo da ETE Insular (Lodo Ativado), é indispensável que se utilize um agente estruturante na mistura para obtenção de maiores temperaturas no interior da leira.

- A mistura lodo/inoculante/estruturante (LIE 60) e a mistura Lodo/Estruturante (LE) foram as misturas que alcançaram as maiores temperaturas, alcançando valores e tempo de exposição acima do exigido pela legislação Resolução 375/06. A carga entre 60 e 80 kg de lodo de ETE por metro quadrado de leira é o melhor intervalo de cargas para obtenção dos valores mínimos de temperatura e tempo de exposição exigido pela Resolução 375/06 para higienização de lodo de esgoto por compostagem termofílica.

- O lodo da ETE Insular apresenta baixas concentrações de substâncias inorgânicas. O mercúrio foi a única substância inorgânica que apresentou valores acima do máximo exigido para comercialização como Fertilizante Orgânico (IN 27/06), todavia com valores permitidos para utilização segura na agricultura (Resolução 375/06).

- O lodo de esgoto da ETE Insular apresenta resultados negativos em relação à *Salmonella* e baixas quantidades de ovos viáveis de helmintos. Entretanto, o lodo da ETE Insular apresenta quantidades de coliformes termotolerantes que inviabilizam sua utilização agrícola de acordo com, a Resolução 375/06, sendo necessária uma forma de higienização deste material para tal fim.

- A compostagem é uma forma eficiente de higienizar o lodo de ETE, podendo eliminar até 100% dos ovos viáveis de helmintos e dos coliformes termotolerantes presentes neste material. Todavia, para coliformes este resultado não foi obtido em todas as amostras analisadas. Na média a compostagem possibilitou a classificação do lodo de ETE como “Tipo B”, e, portanto sujeito a algumas restrições em sua segura aplicação agrícola, limitando-se à cultura do café, à silvicultura e às culturas cujo produto seja fibra e/ou óleo.

- Em síntese, o produto resultante da compostagem do lodo da ETE insular, se mostrou seguro, na média, para aplicação agrícola, uma vez que esteve dentro dos parâmetros legais (substâncias inorgânicas e

patógenos) para classificá-lo como “Tipo B”, estando, portanto sujeito a algumas restrições. Os parâmetros que comprometeram sua classificação como “tipo A”, e conseqüentemente com viabilidade de ser comercializada como fertilizante orgânico foi o excesso de coliformes termotolerantes e de *Salmonella*. Todavia, no caso dos coliformes, em algumas amostras houve uma redução de 100% deste patógeno, **a compostagem demonstra ser uma tecnologia promissora para a plena higienização de lodo de ETE**, sendo necessárias novas pesquisas que otimizem a higienização deste tipo de material.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa afirma que ao invés de descartarmos um material com alta qualidade agronômica (matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, etc.), higienizaremos o mesmo a partir da compostagem termofílica e o utilizaremos para a produção vegetal de forma segura (classificado como “Tipo B” de acordo com a Resolução 375/06), diminuindo os custos de produção, evitando a perda de nutrientes e diminuindo a dependência de insumos químicos.

Deve-se buscar otimizar o manejo da compostagem, adaptando-o ao lodo de ETE, gerando um produto final classificável como Tipo A, e, portanto com maiores possibilidades de aplicação segura na agricultura. Sugere-se para este fim o estudo de maiores períodos de compostagem do lodo, uma vez que é a relação temperatura X **tempo de exposição** os principais fatores para higienização deste material.

Deve-se também, em pesquisas futuras, dobrar os cuidados no momento de amostragem e estocagem do material, dificultando a recolonização de patógenos no lodo da ETE.

Em um primeiro momento deve-se aplicar esta tecnologia a pequenas estações de tratamento, de forma que as soluções de pequenos problemas possam ser realizadas de forma mais fácil e com menor custo.

Sugere-se também um aprofundamento nas pesquisas no sentido de avaliar os efeitos da aplicação do composto de lodo nas características do solo, da água, dos animais e dos homens que, de forma direta ou indireta, entram em contato com o local ou com os produtos produzidos no local em que este material foi aplicado.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, C. A.; ABREU, M. F.; BERTON, R.S. Análise química de solo para metais pesados. **Tópicos em ciências do solo**. v.2, p.645-692, 2002.

ABREU JUNIOR, C. H.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; KIEHL, J.C. Uso agrícola de resíduos orgânicos potencialmente poluentes: propriedades químicas do solo e produção vegetal. **Tópicos em Ciência do Solo**. v.4, p. 391-470, 2005.

AHLBERG, G; GUSTAFSSON, O.; WEDEL, P. Leaching of metals from sewage sludge during one year and their relationship to particle size. **Environmental pollution**. v.144, p. 545-553, 2006.

AITKEN, M. D; SOBSEY, M. D.; BLAUTH, K. E.; SHEHEE, M.; CRUNK, P. L.; WALTERS, G.W. Inactivation of *Ascaris sunn* and poliovirus in biosolid under thermophilic anaerobic digestion condition. **Environmental Science Technology**. v.39, n.15, p.5804-5809, 2005.

AMADO, T. J. C; MIELNICZUK, J; AITA, C. Recomendações de adubação nitrogenada para milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo sob sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. v.26, p.241-248, 2002.

ANDERSON, P. **The Landfill Gas Energy Recovery Hoax Abstract for Landfill Methane Outreach Conference**, 2006. Disponível em www.epa.gov/lmop/conf/9th/Abstracts/anderson_abs.pdf. Acesso em 01/02/2012.

ANDRAUS, S. *Pesquisa de Salmonella spp em amostras de lodo de esgoto e solo: isolamento e identificação*. In: Sanepar. **Manual de métodos para análise microbiológica e parasitológica em reciclagem de lodo de esgoto**. Curitiba. p.59-61, 1998.

ANDREOLLI, C. V; PEGORINI, E. S.; FERNANDES, F. Disposição do lodo no solo. In: ANDREOLLI, C.V.; SPERLING, M. V.; FERNANDES, F. **Lodos de esgoto: tratamento e disposição final**. UFMG. Belo Horizonte. Companhia de Saneamento do Paraná. 4ª

Edição, p.319-396, 2010.

ANDREOLLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. **Reciclagem de Biossólidos: transformando problemas em soluções**. SANEPAR, FINEP, 2ª Edição, Curitiba, p.288, 2001.

ARRAJ, A.; BOHATIER, J.; LAVERAN, H.; TRAORE, O. Comparison of bacteriophage and enteric virus removal in pilot scale activated sludge plants. **Journal of Applied Microbiology**. v.98, p.516-524, 2005.

ATSDR. Priority list of hazardous substances-CERCLA-2007. Disponível em www.atsdr.cdc.gov/cercla/07list.html. Acessado em 1 de outubro de 2011.

BAIRD, Colin. Química Ambiental. 2ª Edição. Editora Bookman, 2002, p.622.

BAYER, C; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A; SILVA, L. Z; CANELLAS, L. P; CAMARGO, F. A de O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre, p.7-18, 2008.

BEATON, J. D.; ROBERTS, T. L.; HALSTEAD, E. H.; COWELL, L. E. Global transformer of P in fertilizer material and a agricultural commodities. In: TIESSEN, H. **Phosphorous in the global environment**. Chichester. John Willey e Sons. p.7-26, 1995.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impactos ambientais do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariuna, Embrapa Meio ambiente, 2000.

BETTIOL, W; CAMARGO, O. A. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto: Descrição do estudo. In: BETTIOL, W; CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura. Embrapa meio ambiente**. Jaguariuna, p.25-35, 2006a.

BETTIOL, W; CAMARGO, O. A. A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola. In: BETTIOL, W; CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto:**

impactos ambientais na agricultura. Embrapa meio ambiente. Jaguariuna, p. 17-24. 2006b.

BITTON, G. **Wastewater microbiology** 3rd Edition. New Jersey, 2005. 765p.

BOEIRA, R. C.; MAXIMILIANO, V. C. B. Dinâmica da mineralização de nitrogênio em lodos de esgoto. IN: BETTIOL, W; CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura.** Embrapa meio ambiente. Jaguariúna, 2006, p.125-136.

BORGES, M. R.; COUTINHO, E. L. M. Metais pesados do solo após aplicação de biossólido- fracionamento. **Revista Brasileira de Ciências do solo.** v.28, p.557-568, 2004.

BOSCH, A.; GUIX, S.; SANO, D.; PINTO, R. M. New tools for the study and direct surveillance of viral pathogens in water. **Current Opinion in Biotechnology**, v.19, p.295-301, 2008.

BOTKIN, D. B., KELLER, E. A, **Environmental Science; Earth as a living planet.** Canadá. 1998, p.676.

BRASIL – CONAMA. Instrução Normativa 375 de 19 de agosto de 2006. **Define critérios e procedimentos para uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados e da outras providencias.** Brasília – CONAMA.

BRASIL – MAPA. Instrução Normativa 27 de 09 de junho de 2006. **Dispõe sobre fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes para serem produzidos, importados ou comercializados.** Brasília – MAPA.

BRASIL – MAPA. Instrução Normativa 25 de 23 de julho de 2009. **Aprova as normas sobre especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura.** Brasília.

BRASIL – Ministério da Ciência e Tecnologia. Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas dos gases do efeito estufa. Brasília. DF, 2002. Disponível em www.mudancasclimaticas.andi.org.br/content/primeiro-inventario-brasileiro-de-emissoes-antropicas-de-gases-de-efeito-estufa. Acesso em 12/12/2011.

BREWTER, J.; OLESZKIEWICZ, J.; BUJOCZEK, G.; REIMERS, R. S.; ABU-ORF, M.; BOWMAN, D.; FOGART, E. Inactivation of *Ascaris* summ eggs in digested and dewatered biosolids and lime and fly ash at bench scale and full scale. **Environmental Engineering Science**. v.2, n.5, p.395-400, 2003.

BRITO, F. S.; MILLER, P. R. M.; STADNIK, M. Presença de *Trichoderma* spp em composto e suas características para o controle de fitopatógenos. **Revista Brasileira de Agroecologia**. v.5, p.43-53, 2010.

BROWN, S. L.; CHANEY, R. L.; ANGLE, J. S.; RYAN, J. A. The phytoavailability of cadmium to lettuce in long-term biosolids-amended soils. **Journal of Environmental Quality**. v.27, n.5, p.1071-1078, 1998.

BUTTENBENDER, S.E. Avaliação da compostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos provenientes da coleta seletiva realizada no município de Angelina/SC. **Dissertação de Mestrado**. UFSC. 2004.

CAMARGO, O.A. Disposição de lodo de esgoto em solo agrícola: instrumental para o pensamento. In: BETTIOL, W; CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Embrapa Meio Ambiente. Jaguariuna, p.37-43, 2006.

CANTARELLA, H; ANDRADE, C. A; MATTOS JUNIOR, D. Matéria orgânica do solo e disponibilidade de N para as plantas. In: SANTOS, G.A; SILVA, L. Z; CANELLAS, L. P; CAMARGO, F.A de O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre. p.581-595, 2008.

CASAN – COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO. 2005. Disponível em www.casan.com.br. Acesso em: 09/01/2012.

CHENG, H.; XU, W.; LIU, J.; ZHAO, Q.; HE, Y.; CHEN, G. Application of composted sewage sludge as a soil amendment for turfgrass growth. **Ecological Engineering**. v.29, p.96-104, 2007.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The history of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**. v.19, p.292-305, 2009.

CORRÊA, R.S.; WHITE, R.E.; WEATHERLEY, J. Modelling the risk of nitrate leaching from two soils amended with five different biosolids. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.619-626, 2005.

DIAS, V. C. F; Estudo das emissões de biogás nos aterros sanitários de Içara e Tijuquinha. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) 115p Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis. 2009.

DUMONTET, S.; SCOPA, A.; KERJE, S.; KROVACEK, K. The importance of pathogenic organism in sewage and sewage sludge. **Air & Waste management**. v.51, p.848-860, 2001.

EATON, A. D.; FRANSON, M. A. H. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21^a Edição. American public health association. 2005, p.1558.

ELSER, J.; BENETT, E. Phosphorus cycle: A broken biogeochemical cycle. **Nature**. v.478, p.29-31, 2011.

EPSTEIN, E. **Land application of sewage sludge and biosolid**. EUA. 2002. p.201.

EPSTEIN, E. **The science of composting**, Pennsylvania. Technomic publishing. 1997, p.493.

FALKOWSKI, P. The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system. **Science**. v.290, p.291-296, 2000.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para a compostagem de biossólidos**. Edição FINEP-PROSAB. Rio de Janeiro. 1999, p.92.

FIALHO, L. L. Monitoramento Químico e Físico do Processo de Compostagem de Diferentes Resíduos Orgânicos. **Relatório Técnico**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2005.

GABUTTI, G.; DE DONNO, A.; BAGORDO, F.; MONTAGNA, M. T. Comparative survival of faecal and human contaminants and use of *Staphylococcus aureus* as an effective indicator of human pollution. **Marine Pollution Bulletin**. v.40, n.8, p.697-700, 2000.

GAMA-RODRIGUEZ, E. F.; GAMA-RODRIGUEZ, A. C. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. Z.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A de O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre, p.159-170, 2008.

GASPARD, P.; SCHWARTZBROD, J. Helminths and protozoa in stabilized sludge for agricultural use: search for an indicator of parasite contamination. In: **CONFERENCE IWA**, 2001, Acapulco. IWA 2001, p.9-14.

GERBA, C. P.; SMITH JR, J. E. Sources of pathogenic microorganisms and their fate during land application of wastes. **Journal Environmental Quality**. v.34, p.42-48, 2005.

GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; HUBNER, A. P.; LUNKES, A.; GUIDINI, F.; AMARAL, E. B. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.38, p.1097-1104, 2003.

GIMENEZ, N. A.; CASARES, P. C.; MAS, S. B.; HUNDESA, A.; RIBAS, F.; GIRONES, R. Distribution of human polioviruses, adenoviruses and hepatitis E in environmental and in a drinking-water treatment plant. **Environmental Science Technology**. v.40, p.7416-7422, 2006.

GOLUEKE, C. G. **When is compost safe?**. Seção IV do Managing Sludge By Composting”. Editado pela “BioCicle Journal of Waste Recycling”, 1984, p.322.

GOMES, L. P. et al. Critérios de seleção de áreas para reciclagem agrícola de lodos de estações de tratamento de esgoto. In: ANDREOLLI, C. V. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, p.189-214, 2001.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; SPERLING, M. V. Remoção da umidade em lodos de esgoto. In: ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, F. **Lodos de esgoto: tratamento e disposição final.UFMG. Belo Horizonte**. Companhia de Saneamento do Paraná. 4ª Edição. p.159-259, 2010.

GROFMANN, P.M., A.M. DORSEY,; Mayer, P.M.. Nitrogen processing within geomorphic features in urban streams. **Journal of the North American Benthological Society**. v.24, p.613-625, 2005.

HAUG, R.T. **The practical handbook of composting engineering**. Boca Raton, Lewis Publisher, Boca Raton, FL, 1993, p.717.

HERNROTH, B.E.; CONDÉN-HANSSON, A.C.; REHNSTAM-HOLM, A.S.; GIRONES, R.; ALLARD, A.K. Environmental factors organisms in the blue mussel, *Mytilus edulis*: the first Scandinavian report. **Applied and Environmental Microbiology**, v.68, p.4523-4533, 2002.

HOGLUND, C. Evaluation of microbial health risks associated with the reuse of source-separated human urine. **Tese de Doutorado**. Swedish Institute for infectious disease control. Royal Institute of technology, 2001.

HOWARD, S. A. **Um testamento agrícola**. Tradução de Eli Lino de Jesus. Apresentação, revisão técnica e notas de rodapé de Luiz Carlos Pinheiro Machado. São Paulo:Expressão Popular, p.360, 2007. Traduzido da edição especial da Rodali Press, USA, 1976.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa nacional do saneamento básico - 2008. Disponível em www.ibge.gov.br acesso em 01/10/11.

INÁCIO, C.T, MILLER, P.R.M. **Compostagem: Ciência e prática aplicadas a gestão de resíduos**. Embrapa Solos. Rio de Janeiro, 2009, p.156.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo - **Boletim Técnico 100**. Fundação IAC. Campinas, 1997, p.285.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for national greenhouse inventories: Reference Manual**. v.3 Disponível em www.ipcc.nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6. Acessado em 08/11/12.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soil and plants**. 3th Edition. Boca raton. 2001, p.413.

KIEHL, J. E. **Fertilizantes Orgânicos**. Piracicaba. Editora Agronômica Ceres Ltda, 1985, p.492.

KOOPMANS, M.; BONSDORFF, C.H.; VINJÉ, J. MEDICI, D.; MONROE, S, Foodborne viruses. **FEMS Microbiol. Rev.** v.26, p.187–205, 2002.

KUCHAR, D.; FUKUTA, T.; ONYANGO, M.S.; MATSUDA, H. Sulfidation treatment of Cooper-containing platin sludge towards Cooper resource recovering. **Journal of Hazardous Material**. v.138, p.86-94, 2006

LEES, D.N. Viroses and bivalves shellfish. **International journal of food microbiology**. v.59, p.81-116, 2000.

LEWIS, G.D.; METCALF, T.G; Polyethylene glycol precipitation for recovery of pathogenic viruses including hepatitis A and human rotavirus from oyster, water and sediments. **Applied and Environmental microbiology**. v.54, n.8, p. 1983-1988, 1998.

LIMA, M.R.P. Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodos de esgoto. **Tese de doutorado** defendida na PUC/SP para a obtenção do título de Doutor em Engenharia. p.284, São Paulo, 2010.

LIMA, D.M.; CUNHA, R.L. da; PINHO, E.V.R.V.; GUIMARÃES, R.J. Efeito da adubação foliar no cafeeiro, em sua produção e na qualidade fisiológica de sementes. **Ciência Agrotécnica**. Edição Especial, p.1499-1505, 2003.

LIPP, E.K.; KURZ, R.; VINCENT, R.; RODRIGUEZ-PALACIOS, C.; FARRAH, S.R.; Rose, J.B.; . **Estuaries**. v.24, p.266-276, 2001.

MAIER, R.M.; PEPPERS, I.L.; GERBA, C.P. **Environmental Microbiology**. 2ª Edição. Oxford. UK. Academic Press, 2009, p.598.

MARTINS, A.L.C.; BATAGLIA, O.C.; CAMARGO, O.A.; CANTARELLA.H. Produção de grãos e absorção de Cu,Fe, Mn, Zn pelo milho em solo adubado com lodo de esgoto com e sem calcário. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. v.27, p.563-574, 2003.

McBRIDE, M.B. Growing food crops on sludge-amended soils: problems with U.S. environmental protection agency method of estimating toxic metal transfer. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v.17, p.2274-2281, 1998.

MELO, V.P. Propriedades químicas e disponibilidade de metais pesados para a cultura do milho em dois latossolos que receberam a adição de biossólido. 2002, p.134. **Dissertação de Mestrado** - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

MELO, W.J. **Matéria orgânica, nitrogênio e enxofre: curso de atualização em fertilidade do solo**. Jaboticabal: ANDA, 1978, p.66.

MELO, W.J.; MARQUES, M. O potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: BETTIOL, W & CAMARGO, O.A. (coord). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariuna. Embrapa Meio Ambiente. p.109-141, 2000.

METCALF,L.; EDDY,H.P. **Wastewater engineer treatment disposal, reuse.** 4ª Edição. New York: - Hill Book, 2003, p.1819.

MHATRE, G. N; PANKHURTS, C. E. Bioindicators to detect contamination of soil with special references to heavy metal. IN:Pankhurst, C. E., Doube, B. M., Gupta, V.V.S.R. (Eds.) **Biological Indicators of Soil Health and sustainable.** CAB International, New York, p.349-369, 1997.

MICHELINA, A. de F.; BRONHAROA, T. M.; DARÉB, F.; PONSANOC, E. H. G. Qualidade microbiológica de águas de sistemas de abastecimento público da região de Araçatuba, SP. **Revista Higiene Alimentar.** São Paulo, v.20, n.147, p.90-95, 2006.

MIELNICZUK, J, Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, GA; SILVA, L.Z; CANELLAS, L.P; CAMARGO, F.A de O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais.** Porto Alegre, p.1-6, 2008.

MILLER, F. C composting as a process base on control f ecologically seletive factors. In: **Soil microbial ecology: application in agricultural and environmental management.** F.B Metting jr. ed. p.515-541, 1993.

MONTAG, D.; GETHKE, K.; PINNEKAMP, J. A Feasible approach of integrating phosphate recovery as struvite at waste water treatment plant. In: **Wastewater biosolid sustainability: technical, managerial and public synergy.** New Brunswick-Canadá. IWA. p.551-557, 2007.

MUÑOZ, S. I. S. Impacto ambiental na área do aterro sanitário e incinerador de resíduos sólidos de Ribeirão Preto: Avaliação dos metais pesados. Tese apresentada à Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo para concorrer ao título de Doutor, pelo Programa de Pós-graduação em Saúde Pública. Ribeirão Preto. 2002.

NELSON, K. L.; Concentration and inactivation of áscaris eggs and pathogen indicator organrsmo in wastewater stabilization pond sludge. **Water Science Technology.** v.48, n.2, p.89-95, 2003.

NOBLE, R.; CONVENTRY, E. Supression the soil borne plantdisease with compost: a review. **Biocontrol Science Technology**. v.15, p.13-20, 2005.

OLIVEIRA, F. C.; MATIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; ROSSETO, R. Efeitos de aplicação sucessivas de lodo de esgoto em latossolo amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: carbono orgânico, condutividade térmica,pH e CTC. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. v.25, p.505-519, 2002.

PAIGNÉ, J.; GIRARDIN, P. Environmental impacts on farm scale composting practices. **Water, Air and Soil Pollut**. v.163, p.45-68, 2004.

PARKINSON, R.; GIBBS, P.; BURCHETT,S;; MISSELBROOK, T. Effect of turning regime and seasonal weather conditions on nitrogen and phosphorus losses during aerated composting of cattle manure. **Bioresource Technology**. v.91 p.171-178, 2004.

PIANA, M. G. Higienização de lodo de estações de tratamento de esgoto por compostagem termofílica. Monografia (Conclusão do Curso) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias. Disponível em: www.tcc.cca.ufsc.br/agronomia/ragr072.pdf. Acessado em: 17/11/09.

PIETRONAVE, S.; FRACCHIA, L.; RINALDI, M.; MARTINOTTI, M.G. Influence of biotic and abiotic factors on human pathogens in a finished compost. **Water Research**. v.38. p.1963-1970, 2004.

PINTO, M. T. Higienização de lodos. In: ANDREOLLI, C. V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES,F. **Lodos de esgoto: tratamento e disposição final**.UFMG. Belo Horizonte. Companhia de Saneamento do Paraná. 4ª Edição. p. 261-298, 2010.

PUIG, M.; JOFRE, J.; LUCENA, F.; ALLARD, A.; WADDEL, G.; GIRONES, R. Detection of Adenoviruses and enteroviruses in polluted water by nested PCR amplification. **Applied and Environmental Microbiology**. v.60, n.8, p.2963-2970, 1994.

RANDLE & FLEGG. Oxygen measurements in a Mushroom Compost Stack. **Scientia Horticulturae**. v.8, p.315-323, 1978.

RAYJ, B.V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba. 2011, p.420.

RAVISHANKARA, A.R.; DANIELS, J. S; PORTMAN, R.W. Nitrous oxide (N₂O): The dominant ozone depleting substance emitted in the 21st century. **Science**. v.326, p.123-125, 2009.

REEVES, D. W. The role of soil organic matter in maintainig soil quality in continous cropping systems. **Soils & Tillage Research**. v.43, p.131-167, 1997.

RYNK. R. et al. ON-farm Composting handbook. NRAES. 1992. p.186.

ROCKSTROM, J. W.; STEFFEN, K; NOONE, Å. PERSSON, F. S. CHAPIN, III; LAMBIN, T. M. LENTON, M; SCHEFFER, C; FOLKE, H. SCHELLNHUMBER, B; NYKVIST, C. A.; DE WIT, T; HUGHES, S; VAN DER LEEUW, H; RODHE, S; SORLIN, P. K; SNYDER, R; COSTANZA, U; SVEDIN, M; FALKENNARK, L; KARLBER, R. W; CORELL, V. J; FABRY, J; HANSEN, B; WALKER, D; LIVERMAN, K; RICHARDSON, P; CRUTZEN, J; FOLEY. 2009 .A safe operation space for humanity. **Nature**. v.461, p.772-475, 2009.

SAHLSTROM, L. A review of survival pathogenic bactéria in organic waste use in biogás plant. **Bioresource Technology**. v.87, p.161-166, 2003.

SANEPAR. **Manual técnico para utilização do lodo de esgoto do Paraná**. SANEPAR. 1997. p.96.

SANTOS, R.D.; CASSOL, P.C.; KAMINSKI, J.; ANGHINONI, I. Fósforo orgânico do solo. In: SANTOS, G.A; SILVA, L.Z; CANELLAS, L.P; CAMARGO, F.A de O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecosystemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre. 2008.

SANTOS, I. N dos,; HORBE, A. M. C.;SILVA, M. S. R; MIRANDA, S. A. R. Influência de um aterro sanitário e de efluentes domésticos nas

águas superficiais do Rio Tarumã e afluentes-AM. **Acta Amazônia**. v.36, p.229-236, 2006.

SANTOS, H. F. Normatização para o uso agrícola dos biossólidos no exterior e no Brasil. In: ANDREOLI, C.V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, F. **Lodos de esgoto: tratamento e disposição final**. UFMG. Belo Horizonte. Companhia de Saneamento do Paraná. 4ª Edição, p.423-462, 2010.

SCHLINDWEIN, A. D. Pesquisa de vírus entéricos humanos em amostras de lodo de estação de tratamento de esgoto (sistema insular) de Florianópolis: Padronização e avaliação de técnicas moleculares e de cultura celular na detecção e viabilidade viral. **Dissertação de Mestrado** UFSC, 2006.

SCHWARTZBROD, L. **Virus humain et santé publique consequences de l'utilisation des eaux usées et des boues en agriculture et conchyliculture**. Disponível em www.who.int/entity/water_sanitation_health/.../virus.pdf. Acesso em 22/9/2011.

SHIDU, J. P. S.; GIBBS, G. A.; HO, G.E.; UNKOVICH, I. The role of indigenous microorganisms in supretion of Salmonella regrowth in composted biossolid. **Water Research**. v.35, p.913-920, 2001.

SHIDU, J. P. S.; TOZE, S. G. Human patógenos and their indicators in biosolid: A literatura review. **Environment International**. v.35, p.187-201, 2009.

SILVA, C. A.; RANGEL, O. J. P.; BETTIOL, W.; MANZATTO, C. V.; BOEIRA, R.C.; DYNIA, J. F. Dinâmica de metais pesados em latossolo adubado com lodo de esgoto em plantas de milho. In: **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. **Embrapa meio ambiente**. Jaguariúna. p.45-107, 2006.

SILVA, S. M. C. P. Principais contaminantes do lodo. In: ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M. V.; FERNANDES, F. **Lodos de esgoto: tratamento e disposição final**. UFMG. Belo Horizonte. Companhia de Saneamento do Paraná. 4ª Edição. p.69-122, 2010.

SILVA, F. C., Uso de resíduos orgânicos na agricultura. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L. Z; CANELLAS, L. P; CAMARGO, F.A de O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais.** Porto Alegre, p.597-624, 2008.

SILVA, M. O. S. A. **Análise Físico-Químicas para controle de Estações de Tratamento de Esgotos.** São Paulo: CETESB, 1982.

SKRABES, S.; GASSILOUD, B.; SCHWARTZBROD, L.; GANTZER, C. Survival of infected poliovirus-1 in river water compared to the persistence of somatic coliphages, thermotolerant coliforms and poliovirus-1 genome. **Water Research.** v.38, p.2927-2933, 2004.

SMITH JR, J.E.; MILLNER, P. D.; JAKUBOWSKI, W.; GOLDSTEIN, N.; RYNK, R. (ED). **Contemporary perspective on infectious disease agents in sewage sludge and manure.** Pennsylvania, The JG press, 2004, p.233.

SMITH, P et al. Climate Change 2007: Mitigation of climate change: Contribution of working group to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Disponível em www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml. Acesso em 20/01/12.

SOARES, E. M. B. Impacto de aplicações sucessivas de lodo de esgoto sobre os compartimentos de carbono orgânico em latossolo cultivado com milho. **Dissertação de Mestrado.** Universidade Federal de Lavras. Lavras. 2005.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Núcleo Regional Sul. **Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC. Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.** 10ª Edição. Porto Alegre, 2004, p.400.

SOMMER, S.G.; MOLLER, H.B. Emission of greenhouse gases during composting of deep litter from pig production – effect of straw content. **Journal of Agricultural Science,** v.134, p.327-335, 2000.

SPERLING, M. V. **Lodos ativados: princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** Belo Horizonte. UFMG. 1997, p.417.

SPERLING, M. V.; ANDREOLLI, C.V. Introdução. In: ANDREOLLI, C.V.; SPERLING, M. V.; FERNANDES, F. **Lodos de esgoto: tratamento e disposição final.** UFMG. Belo Horizonte. 4ª Edição. p.13-16, 2010.

TEDESCO, M.J; SELBACH, P.A; GIANELLO, C; CAMARGO, F.A.O. Resíduos orgânicos. . In SANTOS, G.A; SILVA, L.Z; CANELLAS, L.P; CAMARGO, F.A de O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais.** Porto Alegre, p.13-136, 2008.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais.** 2ª Edição. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Solos, 1995, p.147.

TEIXEIRA, C. Dinâmica de gases (CO₂, O₂ e CH₄) e de temperatura em compostagem estática com aeração natural no Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro. Monografia (conclusão de curso)-Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências agrárias. Disponível em www.tcc.cca.ufsc.br/agronomia/ragr063.pdf 2009.

TRABELSI, A.; GRATTARD, F.; NEJMEDDINE, M.; BURLET, T.; POZZETO, B. Evaluation of an enterovirus group-specific anti-VP1 monoclonal antibody, 5-D8/1 in comparison with neutralization and PCR for rapid identification of enterovirose in cell culture. **Journal of Clinical Microbiology.** v.33, n.9, p.2454-2457, 1995.

TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgoto. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Eds) **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, p.69-106, 2000.

TSUTIYA, M. T. Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTIYA, M. T.;COMPARINI, J. B.; ALEM, P. S.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. **Biossólidos na agricultura.** 1ª Edição. São Paulo: SABESP, p.89-131, 2001.

UNEP. **Near-term Climate Protection and Clean Air Benefits: Actions for Controlling Short-Lived Climate Forcers**. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi, Kenya, 2011, p.78.

US EPA- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY- **Control of pathogen and vector attraction in sewage sludge**. EPA/625/R-92/013: Cincinnati, 2003, p.177.

VANDERMEER, J.. The ecological basis of alternative agriculture. **Annual Review of Ecology and Sistematic**. Palo Alto, v.26, p.201-224, 1995.

VAZ, L. M. S.; GONÇALVES, J. L. M. Uso de biossólidos em povoamento de eucalipto: efeito em atributos químicos do solo, no crescimento e na absorção de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.747-758, 2002.

VILLAR, L.D. Estudo da lixiviação bacteriana de metais presentes em lodo de esgoto sanitário. Tese de Doutorado. Universidade estadual paulista, Araraquara, 2003.

WEF – World Economic Forum - **Operation of municipal wastewater treatment plant**. 5^a Edição. 1996.

WHO – World Health Organization- **Regional office for the eastern Mediterranean regional centre for environmental wealth activities**. Jordânia. 2004.

WRIGHT, J.. Biosolid recycling and food safety issu. **Environmental Science and Technology**. v.15, p.43-78, 2001.

YEH, H.Y.; YATES, M.V.; CHEN, W.; MULCHANDANI, A. Real-time molecular methods to detect infectious viruses. **Seminars in Cell & Developmental Biology**, v.20, p.49-54, 2009.

APÊNDICE

A. DIMENSIONAMENTO DE UM PÁTIO DE COMPOSTAGEM PARA HIGIENIZAÇÃO DO LODO DA ETE INSULAR

A.1. Preparo do Pátio de compostagem para receber o lodo

Verificou-se que a carga de 80 kg de lodo de ETE por metro quadrado de leira pode ser aplicada em um sistema misto de compostagem de resíduos (lodo de ETE e restos de alimentos) sem que haja diminuição da temperatura da leira. Assim, a partir destes resultados foi dimensionado uma operação com a finalidade de definir as quantidades de resíduos e a área necessária para tratar o lodo da ETE Insular.

Inicialmente deverá ser inserida uma camada de 3,5 kg/m² de material estruturante, seguido por uma camada de 48 kg/m² de restos de alimentos, que servirão como material de fácil degradação, e, conseqüentemente, de produção de altas temperaturas. Esta mistura deverá ser coberta com outra camada de 3,5kg/m² de material estruturante, e com uma camada de 13 kg de palha por metro quadrado de leira.

Nas duas camadas subseqüentes, realizadas com um intervalo de três dias entre elas, deverão ser incorporados 48 kg/m² de restos de alimentos e 35 kg/m² de material estruturante por camada, cada uma coberta ainda com treze kg de palha, conforme descrito na metodologia de Inácio & Miller (2009).

Deste modo, para tornar a leira termofílica, são necessários aproximadamente nove dias e a utilização de restos de alimentos, agente estruturante e palha conforme tabela a seguir.

Tabela I - Quantidade de restos de alimentos, agente estruturante e palha por metro quadrado para uma leira alcançar a fase termofílica.

	Quantidade (kg/m²)
Restos de alimentos	144
Agente estruturante	14
Palha	39

A.2. Área de leira necessária diariamente

Área de leira necessária por dia = Geração diária de lodo⁵/carga por área de leira, ou seja,

- 35.000 kg /80 kg m⁻²
- 437,5m² de leiras/ dia

Portanto, para compostar 35 toneladas diárias de lodo de esgoto são necessários aproximadamente 450 m² de leiras.

A.3. Número de leiras necessárias diariamente e o ciclo das leiras

Um pátio de compostagem foi dimensionado com leiras de 50 metros de comprimento por 3 metros de largura, ou seja, 150m² (Figura I). Como são necessários aproximadamente 450 m² diários de leira, serão necessárias três leiras por dia para o tratamento deste material.

Uma das principais vantagens de se utilizar leiras estáticas com aeração natural é que esta permite fazer a incorporação dos resíduos em camadas, necessitando menor área quando comparadas com outros métodos de compostagem.

No caso do lodo de ETE estas incorporações deverão ser feitas da seguinte forma:

- Três dias após a aplicação da última camada de restos de comida e material estruturante, para aquecimento da leira, será feita a incorporação do lodo de ETE na ordem de 80 kg/m²;

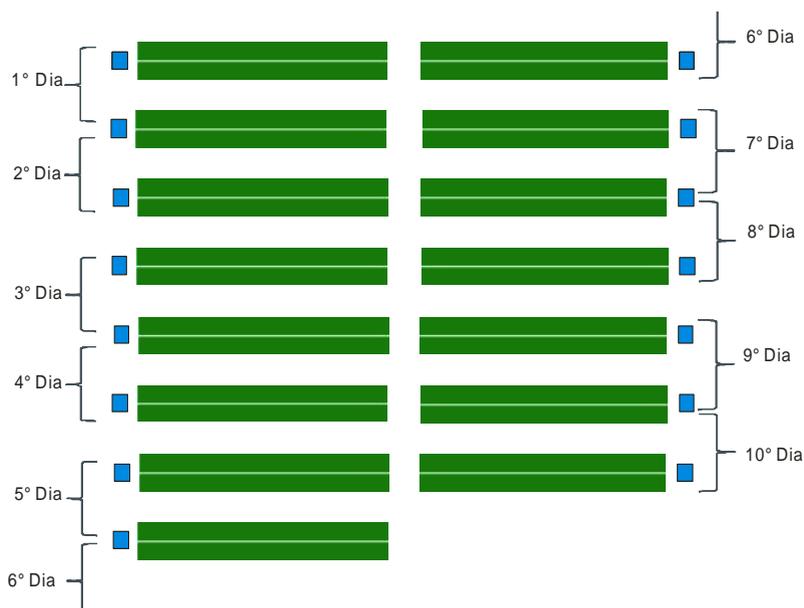
⁵ Segundo Alexandre Trevisan, Engenheiro Químico da CASAN, são produzidos diariamente 35 toneladas de lodo na Estação de Tratamento de Esgoto Insular

- Sete dias após a aplicação do lodo de ETE (tempo para eliminação/inativação de patógenos) será feita nova incorporação de restos de alimentos, e assim sucessivamente até a 19ª aplicação de biossólido. Assim, cada leira terá uma nova incorporação de lodo de ETE a cada 10 dias (Figura I).

Desta forma, como são necessárias três leiras por dia e dez dias para que uma leira volte a receber lodo de ETE, são necessárias 30 leiras durante o ciclo de 190 dias.

Após este período, estas leiras não serão mais utilizadas e passarão por um período de seis meses de maturação.

Figura I - Ciclo de incorporação do lodo da ETE nas leiras de compostagem



A partir do 11º dia o ciclo se repete por 18 vezes, higienizando o lodo produzido pela ETE Insular de Florianópolis em um período de 190

dias.

A.4. Área necessária para um ciclo das leiras

Como cada leira ocupa 150m², e são necessárias 30 leiras durante um ciclo de compostagem de lodo de ETE, temos a necessidade de uma área de 4.500m² apenas de leiras, em um pátio de compostagem com demanda de 1050 toneladas de lodo de ETE por mês.

Além da área da leira, faz-se necessário um espaçamento de 6 metros entre cada duas leiras para circulação de máquinas e um espaçamento de 3 metros em uma das extremidades da leira para instalação de um sistema de coleta de percolado. Portanto, na área das leiras é necessário um espaço de 10.080m² para as leiras, coleta de percolado e área de circulação de máquinas apenas no 1º ciclo (Figura II).

A.5. Preparo do 2º ciclo de leiras

O segundo ciclo de leiras deverá ser exatamente igual ao primeiro, sendo utilizado entre o 191º dia do ano e o 365º dia do ano.

Para a instalação das leiras, coleta de percolado e áreas para circulação das máquinas, é necessária uma área também de aproximadamente 10.080m².

Ressalta-se que próximo ao 360º dia é importante remover as leiras provenientes do 1º ciclo para o local de armazenamento do composto maturado, liberando esta área para construção de novas leiras para a realização do 1º ciclo do 2º ano.

Portanto, para compostar o biossólido produzido pela ETE Insular-CASAN no período de um ano são necessários 20.160 m² de área para as leiras e para a circulação das máquinas.

Todavia, para o dimensionamento de um pátio de compostagem além da área operacional propriamente dita é preciso considerar outras áreas para benfeitorias, a saber:

- área para armazenamento de palha (1000 m²);
- área para armazenamento de material estruturante (1000 m²);
- área para armazenamento de ferramentas bombonas (250 m²);
- área para armazenamento do composto maturado (1750 m²);
- área para transbordo, lavação e captação de água da lavação (400 m²).

Além disto, é imprescindível destinar uma área de bordadura em todo o pátio para minimizar o impacto visual e a transmissão de odores. Esta bordadura deverá ter em torno de 20m em todos os lados do pátio, exceto no lado em que estão as benfeitorias, uma vez que as mesmas não causam perturbações à vizinhança. (11.200m²)

Assim sendo, a área total do pátio de compostagem deverá ter em torno de 39.072m² (148 m X 264 m), ou seja, aproximadamente 4,0ha, distribuídos conforme a figura abaixo.

Figura II - Croqui do Pátio de compostagem

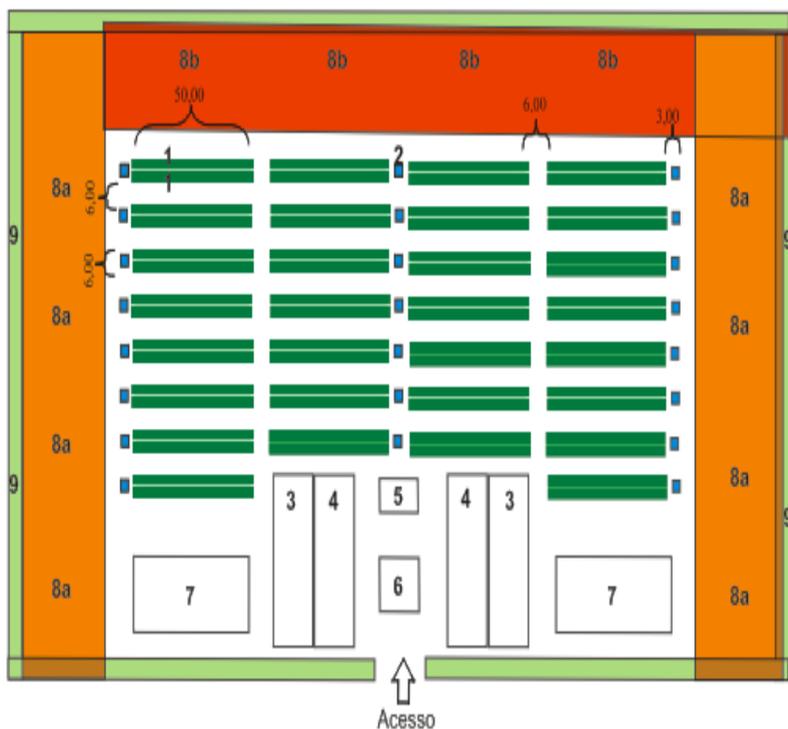


Tabela II - Função, dimensões e área das benfeitorias do Pátio de compostagem

	Função	Dimensão	Área
1	Leira	3, 00 m X 150 m	450 m ²
2	Caixa d'água	10.000l	
3	Área coberta para estocagem de palha	20.00m X 50,00 m	1000 m ²
4	Área coberta para estocagem do material estruturante	20.00m X 50,00 m	1000 m ²
5	Área para lavação	20,00 m X 20,00 m	400 m ²
6	Área fechada para guarda de ferramentas e materiais	12,5 m X 20,00 m	250 m ²
7	Área coberta para armazenamento do composto maturado	35,00m X 50, 00 m	1750 m ²
8a	Bordadura	20,00 m X 296,00 m	5920 m ²
8b	Bordadura	20,00 m X 264,00 m	5280 m ²
9	Cerca viva	3,00 m X 560,00 m	1680 m ²

A.6. Quantidade de materiais necessários no processo

Tabela III - Materiais para confecção inicial de 30 leiras (antes de incorporar o lodo)

Material	Quantidade (kg/m²)	Quantidade por leira de 150 m² (kg)
Restos de alimentos	4.320	648.000
Agente estruturante	420	63.000
Palha	1170	67.500

Após a leira estar na fase termofílica inicia-se a aplicação do lodo, utilizando o tratamento LIE 80 e seguindo a mesma metodologia descrita no Experimento 3. A cada aplicação são necessários os seguintes materiais (aqui já estão computados os materiais necessários para aplicação de restos de alimentos e agente estruturante que serão incorporados entre as camadas de lodo), conforme Tabela IV.

Tabela IV - Quantidade de material incorporado nas leiras de compostagem após a fase termofílica

Material	Quantidade e/ camada/m²	Quantidade em 19 camadas (semestral) /m²	Quantidade de nas 19 camadas em leiras de 150m²	Quantidade de total nas 30 leiras por semestre
Resto de alimento (kg)	48	912	136.800	4.104.000
Biossólido (kg)	80	1520	228.000	6.840.000
Estruturante (kg)	10,5 ⁶	199,5	29.925	897.750
Palha (kg)	13	247	37.050	1.111.500

Densidade: Estruturante: 100 kg / m³

Palha: 66,6 kg/m³

⁶ Desta quantidade 3,5kg/m² foram aplicadas na mistura “LIE”, 3,5 aplicadas sobre a camada LIE e 3,5 sobre a camada intermediária de restos de alimentos.

Ressalto que a Tabela III faz referência às necessidades de materiais para que as leiras alcancem as temperaturas termofílicas, enquanto que a Tabela IV indica as quantidades de materiais após a leira já estar aquecida, e, portanto ao processo de incorporação de lodo bruto e as misturas do tratamento LE. O resultado da soma destas duas Tabelas está expresso na Tabela V.

A.7. Disponibilidade de materiais no CETRES-COMCAP e necessidade para compostagem

Na Tabela V são apresentadas as quantidades de materiais necessários para compostagem semestral do biossólido da CASAN, assim como as quantidades destinadas ao CETRE (Centro de Transbordo de Resíduos sólidos), segundo dados da COMCAP Relatório mensal- CETRES).

Tabela V - Disponibilidade de materiais no CETRES-COMCAP e necessidade para compostagem⁷

Material	Quantidade necessária para compostagem semestral (kg)	Quantidade destinada semestralmente ao CETRES (Kg)	Proporção em relação ao necessário para 6 meses de compostagem de biossólido
Palha	1.287.000	354.000	28%
Estruturante	930.750	459.000	49%
Restos de alimentos	4.752.000	27.000.000	+ 100%

⁷ Os valores aqui descritos são a soma dos materiais utilizados para o processo alcançar a fase termofílica (Tabela 18) e após a fase termofílica (Tabela 21).

A partir dos resultados expostos, pode-se observar que atualmente, por não haver demanda específica e organizada dos materiais utilizados no processo da compostagem, principalmente a palha e o agente estruturante, estes acabam tendo destinações incorretas ou são abandonados, acumulando-se e prejudicando a operacionalidade de diversos locais. Assim, sugerimos o seu direcionamento para o hipotético Pátio de compostagem, suprimindo o déficit destes materiais.

Desta forma, fica claro que, para a realização de um Pátio de Compostagem deste porte, é imprescindível que o projeto seja feito em parceria com a COMCAP, de forma que grande parte dos materiais coletados seja levada a este pátio de compostagem, disponibilizando diariamente o agente estruturante e a palha para o processo.

A área total deste hipotético pátio de compostagem é de aproximadamente 40.000 metros quadrados, beneficiando uma população de aproximadamente 150.000 habitantes, ou seja, aproximadamente 0,25m²/ habitante.

A compostagem e posterior aplicação agrícola do lodo produzido anualmente pela ETE Insular proporcionará que 283,5 toneladas de nitrogênio (referente a cerca de 700 toneladas de uréia) e 107,1 toneladas de (referente a cerca de 250 toneladas de fosfato supertriplo) sejam recicladas. Isso proporcionará melhorias na fertilidade do solo, incrementando a produção agrícola, possibilitando a redução da utilização de adubos sintéticos, diminuindo os impactos ambientais negativos da deposição do lodo em aterros sanitário e aumentando a vida útil dos mesmos. Do ponto de vista econômico, a ciclagem do nitrogênio e do fósforo presentes no lodo de ETE representaria uma economia de aproximadamente R\$1.000.000,00⁸ anuais em adubos sintéticos.

Além dos benefícios proporcionados pela ciclagem dos nutrientes, também é notável a diminuição das quantidades de metano liberados pela degradação dos resíduos orgânicos na compostagem em comparação com os aterros sanitários. Segundo Inácio et al. (2010), 1,0 Mg de restos de alimentos gera 0,85 tCO₂ - eq em aterros sanitários e apenas 0,00 84 tCO₂ – eq em processos de compostagem, ou seja, uma diminuição de aproximadamente 90%.

Em relação ao óxido nitroso, deve-se realizar futuros estudos para

⁸ Para o cálculo foi utilizado um valor médio entre uréia e superfosfato triplo, que é de aproximadamente R\$1.000 a tonelada.

calcular as quantidades emitidas durante o processo da compostagem e compará-lo com as emissões em aterros sanitários.