

FLÁVIO JOSÉ DE ASSIS BARONY

**BIOSSÓLIDOS: PRODUÇÃO, EFEITOS NO CRESCIMENTO DE MUDAS  
DE EUCALIPTO E AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE HUMANA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2011

FLÁVIO JOSÉ DE ASSIS BARONY

**BIOSSÓLIDOS: PRODUÇÃO, EFEITOS NO CRESCIMENTO DE MUDAS  
DE EUCALIPTO E AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE HUMANA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 23 de Fevereiro de 2011.

---

Prof<sup>a</sup>. PAULA DIAS BEVILACQUA  
(CO-ORIENTADORA)

---

Prof. NAIRAM FÉLIX DE BARROS  
(CO-ORIENTADOR)

---

Prof. Ivo Jucksch

---

**Prof. Rafael Kopschitz Xavier Bastos**  
(ORIENTADOR)

“Já indicamos que, na medida do possível, a cidade deve estar em comunicação, ao mesmo tempo, com o interior do país, o mar e a totalidade de seu território. A cidade deve oferecer aos seus cidadãos uma saída fácil. Antes de tudo, ela deve ter água e fontes naturais em abundância. Eis por que, nos Estados sabiamente governados, se todas as fontes não são igualmente puras e se há carência de fontes de boa qualidade, as águas que servem para alimentação devem ser separadas das que se destinam as outras coisas”.

Aristóteles, filósofo grego (384 – 322 a.C.)

À minha esposa (Edimara), nossa filha (Pietra) e a todos os nossos familiares, que são a base desse trabalho, mesmo à distância...

## AGRADECIMENTOS

A minha lista de agradecimentos é um livro que aqui sintetizo e peço desculpas desde já no caso de ter omitido algum nome.

Primeiramente ao Mestre dos Mestres, DEUS, pela vida, saúde e por ter possibilitado a existência de pessoas importantes e decisivas no meu dia a dia.

À minha filha e à minha esposa, pelo constante apoio, incentivo, compreensão (inclusive pelos fins de semana em Viçosa), amor, carinho, críticas e também sugestões ao longo do trabalho. Essa vitória também é sua!

Agradeço aos meus pais, irmãs, sobrinhas, cunhados e várias outras pessoas de outros graus de parentesco pelos valores e ensinamentos da vida.

Ao grande professor Rafael Bastos pela total credibilidade, incentivo e por ser difusor de conhecimento nessa área tão carente no Brasil (saneamento). Enalteço a oportunidade ímpar concedida com este curso de Pós-graduação que, diga-se de passagem, antes de mais nada foi um senhor complemento da graduação!

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Civil pelo aceite como aluno no programa. À equipe da ETA: Luis Eduardo (o “para-raios” da ETA), Regiane, Jesana, Silvério, Sebastião e Miguel pelo apoio nas coletas e no cotidiano, além dos demais integrantes da equipe.

Ao professor Nairam Félix de Barros pela oportunidade concedida, inclusive ainda quando na condição de aluno não vinculado e pela co-orientação. Sou igualmente agradecido à professora Paula Dias Bevilacqua, pela co-orientação e apoio indispensável.

Agradeço também as professoras Ann Honor, Maria Lúcia Calijuri, Izabel Azevedo e Ana Augusta (Departamento de Engenharia Civil), bem como aos professores Marcos Rogério Tótola e Arnaldo Chaer (Departamento de Microbiologia) e Fernando Reis (Departamento de Estatística).

Ao professor Laércio Jacovine, do Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade de iniciar minha caminhada aqui na UFV, ainda como aluno não vinculado.

À equipe de trabalho, imprescindível nesta trajetória, um muito obrigado, pois aprendi muito com vocês: Belquior, Edgar, Tiago, Grazielle, Maísa, Luciana e Gabriela. Um agradecimento em especial à Ketty, Alyne e Paulo, pelo convívio, sobretudo nos momentos mais adversos ao longo da condução desse trabalho.

Aos colegas de estudo: Henrique, Reni, João, Alessandra, Marina, Ketty, Adriana, Endrik, Demétrius, Mauro, Tatiane e Ana.

Ao Marco Antônio, responsável pela empresa Plantil ([www.plantil.com.br](http://www.plantil.com.br)), pelo apoio e fornecimento dos clones.

Ao Prof. Renildes, do Departamento de Solos, por ceder o espaço para realização do experimento. Ao Braz (Laboratório de Matéria Orgânica), Igor, Carla (secretária), Elderson e Cláudio (laboratório) e João Leles (almoxarifado).

Aproveito para lembrar de outros que muito contribuíram, como: Valéria Godinho (UFMG), equipe do viveiro da UFV (Alex e Ramon), Reinaldo (Setor de Transportes da UFV), Anderson (doutorando do Departamento de Engenharia Civil), Simão (Departamento de Engenharia Agrícola), SAAE de Viçosa, representado pelo Miguel e Adão, além de sua equipe de trabalho.

A galera da república de Viçosa (Patrik, Felipe, Élcio, Wagner, Vanildo e Leandro).

Aos meus alunos, pela inesgotável fonte de conhecimento. Agradeço também à equipe de trabalho da Escola Estadual Dr. Mariano da Rocha, testemunha da luta diária, além da torcida pelo ingresso neste programa de pós-graduação.

Agradeço à Secretaria Estadual de Educação de Minas Gerais pela concessão da licença, indispensável para conclusão deste trabalho. Agradeço também à licenciada Tatiane pelos dados do processo e à colega Adriana da Secretaria de Educação.

Aos demais amigos e familiares...

## **BIOGRAFIA**

Flávio José de Assis Barony, filho de Jair Barony Marques e Sebastiana de Lana Assis Marques, nasceu no dia 13 de setembro de 1979 no município de Timóteo / MG.

Cursou o Ensino Fundamental I na Escola Estadual Capitão Egídio Lima no período de 1986 a 1990. Cursou o Ensino Fundamental II no Colégio Municipal de Timóteo, no período de 1991 a 1994. Cursou o 1º Ano do Ensino Médio no Colégio Municipal de Timóteo em 1995 e o curso Técnico em Meio Ambiente pela Cooperativa Educacional Vale do Aço no período de 1996 a 1998.

Também em 1996 cursou “Mecânica Geral” pelo SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial) vinculado à Acesita, vindo a se efetivar nesta empresa em 1997.

Ingressou no curso de Ciências Biológicas (Licenciatura) do UNILESTEMG (Centro Universitário do Leste de Minas Gerais) em 2000, vindo a concluir o curso em 2003.

Entre 2004 e 2006 especializou-se em Engenharia Sanitária e Ambiental também pelo UNILESTEMG.

Desligou-se da Acesita em março de 2007 para se dedicar ao Mestrado na UFV (Universidade Federal de Viçosa), ainda como estudante não-vinculado, e à docência, que foi iniciada em 2006 na Rede Estadual de Minas Gerais, como professor de Biologia e Ciências após nomeação em concurso público.

Em 2008 iniciou o Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFV na área de concentração em “Saneamento Ambiental”, vindo a concluir os requisitos necessários à obtenção do título de “Magister Scientiae” em fevereiro de 2011.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE QUADROS .....	xv
LISTA DE TABELAS.....	xvi
RESUMO.....	xix
ABSTRACT .....	xxi
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
Referências .....	5
CAPÍTULO 2.....	10
PRODUÇÃO DE BIOSSÓLIDOS PARA USO FLORESTAL.....	10
2.1. Introdução .....	10
2.2. Revisão de literatura .....	12
2.2.1. Características dos esgotos sanitários.....	12
2.2.2. Produção de lodo em processos de tratamento de esgotos .....	15
2.2.3. Processos de tratamento de lodos de esgotos .....	17
2.2.3.1. Caleação.....	20
2.2.3.2 - Secagem em estufa agrícola (solarização).....	23
2.2.4. Características dos bioossólidos de interesse à aplicação florestal.....	26
2.2.5. Regulamentação sobre o uso de bioossólidos.....	29
2.3. Objetivos.....	35
2.4. Material e métodos .....	35
2.4.1. Produção de bioossólidos .....	35
2.4.1.1. Caleação.....	38
2.4.1.2. Secagem em estufa .....	40
2.4.1.3. Preparos adicionais do bioossólido para o plantio de mudas de eucalipto em tubetes .....	41
2.4.2. Parâmetros de controle .....	42
2.5. Resultados e discussão.....	44
2.5.1. Temperatura .....	44
2.5.2. Umidade.....	46
2.5.3. Sólidos totais.....	49
2.5.4. pH .....	51

2.5.5. Coliformes totais, <i>E.coli</i> e <i>Salmonella</i> .....	52
2.5.6. Ovos viáveis de helmintos .....	58
2.6. Conclusões .....	63
2.7. Referências .....	65
CAPÍTULO 3.....	76
PRODUÇÃO DE MUDAS DE <i>Eucalyptus urophylla</i> COM USO DE BIOSSÓLIDO.....	76
3.1. Introdução .....	76
3. 2. Revisão de literatura .....	78
3.2.1. Uso florestal de bioossólidos .....	78
3.2.2. Aspectos relacionados à produção de mudas florestais.....	81
3.3 Objetivo .....	86
3.4. Material e métodos .....	86
3.4.1. Produção de mudas de eucalipto com uso de sementes.....	86
3.4.1.1. Delineamento experimental .....	86
3.4.1.2. Composição dos substratos.....	89
3.4.1.3. Condução dos experimentos .....	90
3.4.1.4. Parâmetros de controle .....	94
3.4.2. Produção de mudas com uso de clones.....	95
3.5. Resultados e discussão.....	96
3.5.1. Produção de mudas de <i>Eucalyptus urophylla</i> com uso de sementes.....	96
3.5.1.1 Germinação e sobrevivência.....	96
3.5.1.2. Altura das mudas, diâmetro do colo, matéria seca da parte aérea e matéria seca da raiz.....	98
Análise de variância e testes de diferenças de médias.....	98
Testes de regressão .....	104
3.5.2. Produção de mudas com uso de clones.....	112
3.5.2.1 Sobrevivência .....	112
3.6. Conclusões .....	114
3.7. Referências bibliográficas .....	115
CAPÍTULO 4.....	122
AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE ASSOCIADO AO USO DE BIOSSÓLIDOS PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE EUCALIPTO .....	122
4.1. Introdução.....	122

4.2. Revisão de literatura .....	124
4.2.1. Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico – aspectos conceituais ...	124
4.2.2. Estudos de AQRM aplicados ao uso de biossólidos.....	127
4.3. Objetivos.....	130
4.4. Material e métodos .....	131
4.4.1. Identificação do perigo .....	131
4.4.2. Modelo de exposição .....	132
4.4.3. Estimativa das doses .....	133
4.4.4. Modelo dose-resposta .....	134
4.4.5. Determinação do teor de sólidos e da qualidade microbiológica da água de lavagem de luvas utilizadas no manuseio do biossólido. ....	135
4.4.6. Análises laboratoriais.....	136
4.5. Resultados e discussão.....	137
4.6. Considerações finais .....	146
4.7. Referências .....	148
5. Conclusões Gerais .....	153

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ilustração esquemática de um reator UASB .....	16
Figura 2.2 - Reator UASB (a), leito de secagem coberto (b) e biofiltro submerso aerado (c), ETE Violeira, Viçosa-MG.....	36
Figura 2.3 - Cobertura do leito de secagem, ETE Violeira, Viçosa-MG.....	36
Figura 2.4 - Lodo no leito de secagem recém descartado (a) e após cerca de 15 dias (b), ETE Violeira, Viçosa-MG .....	36
Figura 2.5 - Lodo remanescente (a ser enviado para estufa) sete dias após o descarte e após retirada de metade do lote para caleação.....	38
Figura 2.6 - Mistura do lodo com a cal em betoneira (esquerda) e lodo caleado logo após mistura (direita) .....	39
Figura 2.7 - Casa lodo caleado (esquerda) e lona de cobertura das leiras (direita) .	39
Figura 2.8 - Estufa para secagem do lodo. Vista geral (esquerda) e detalhe da cortina frontal aberta e do lodo no interior da estufa (direita).....	40
Figura 2.9 - Revolvimento do lodo na estufa .....	41
Figura 2.10 – Lodo disposto sobre lona plastica para secagem adicional e quebra prévias à moagem. ....	42
Figura 2.11 – Moinho utilizado para reduzir a granulometria do lodo.....	42
Figura 2.12 – Teor de umidade (%) do lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 1.....	47
Figura 2.13 – Teor de umidade (%) do lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 2.....	47
Figura 2.14 – Teor de umidade (%) do lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 3.....	47
Figura 2.15 – Teor de sólidos totais (%) do lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 1. ....	50
Figura 2.16 – Teor de sólidos totais (%) do lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 2. ....	50
Figura 2.17 – Teor de sólidos totais (%) do lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 3. ....	50
Figura 2.18 – Valores de pH do lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 1.....	51

Figura 2.19 – Valores de pH do lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 2.....	52
Figura 2.20 – Valores de pH do lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 3.....	52
Figura 2.21 – Concentrações de coliformes totais no lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 1.....	53
Figura 2.22 – Concentrações de coliformes totais no lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 2.....	54
Figura 2.23 – Concentrações de coliformes totais no lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 3.....	54
Figura 2.24 – Concentrações de <i>E.coli</i> no lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 1 .....	54
Figura 2.25 – Concentrações de <i>E.coli</i> no lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 2. ....	55
Figura 2.26 – Concentrações de <i>E.coli</i> no lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 3. ....	55
Figura 2.27- Vegetação com crescimento em direção ao interior da casa de lodo caleado. ....	56
Figura 2.28 – Contagens de ovos viáveis de helmintos no lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 1.....	59
Figura 2.29 – Contagens de ovos viáveis de helmintos no lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 2.....	59
Figura 2.30 – Contagens de ovos viáveis de helmintos no lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 3.....	59
Figura 3.1 – Detalhe dos experimentos em casa de vegetação. Cada fila da bandeja representa uma parcela de 10 mudas, com os tratamentos dispostos em lados opostos. ....	88
Figura 3.2 - Detalhe dos experimentos em casa de vegetação. Crescimento das raízes de alguns tratamentos. ....	88
Figura 3.3 – Casa de sombra do viveiro da Universidade Federal de Viçosa onde foram preparados os tubetes para plantio das sementes de <i>Eucalyptus urophylla</i> ...	91
Figura 3.4 – Tubetes com mudas de eucalipto para seleção e repicagem após atingir 3 cm .....	92

Figura 3.5 - Casa de vegetação do DPS UFV onde foram dispostas as bandejas com as mudas selecionadas de <i>Eucalyptus urophylla</i> . .....	92
Figura 3.6 - Ilustração esquemática dos testes de irrigação na casa de vegetação, bancadas 18 e 21. Os círculos centrais representam os aspersores.....	94
Figura 3.7 - Crescimento das mudas dos tratamentos 4.2 (à esquerda) e 4.3 (à direita) divididos pela régua. ....	99
Figura 3.8 – Mudas de tratamento testemunha (à esquerda na bandeja). .....	101
Figura 3.9 - Raiz mergulhada em pote para remoção do substrato (esquerda) e exemplo da necessidade de remoção criteriosa do substrato remanescente para evitar perda de raiz (direita).....	102
Figura 3.10 – Altura das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido caleado classe A.....	105
Figura 3.11 – Diâmetro do colo das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido caleado classe A .....	105
Figura 3.12 – Massa seca da parte aérea das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido caleado classe A.....	105
Figura 3.13 – Massa seca das raízes das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido caleado classe A .....	106
Figura 3.14 – Altura das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido caleado classe B.....	107
Figura 3.15 – Diâmetro do colo das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido caleado classe B .....	107
Figura 3.16 – Massa seca da parte aérea das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido caleado classe B .....	107
Figura 3.17 – Massa seca das raízes das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido caleado classe B.....	108
Figura 3.18 – Altura das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido de estufa classe A .....	109
Figura 3.19 – Diâmetro do colo das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido de estufa classe A. ....	109
Figura 3.20 – Massa seca da parte aérea das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido de estufa classe A.....	109
Figura 3.21 – Massa seca das raízes das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido de estufa classe A. ....	110

Figura 3.22 – Altura das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido de estufa classe B.....	111
Figura 3.23 – Diâmetro do colo das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido de estufa classe B .....	111
Figura 3.24 – Massa seca da parte aérea das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido de estufa classe B .....	111
Figura 3.25 – Massa seca das raízes das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido de estufa classe B.....	112
Figuras 3.26: Comparação entre o crescimento e remoção do substrato de raízes do plantio com sementes (à esquerda) e plantio clonal (à direita).....	114
Figura 4.1 – Umedecimento do lodo com luvas (à esquerda) e limpeza das luvas para análise da água de lavagem (à direita). .....	136

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Parâmetros de controle, tipo e periodicidade de coleta das amostras e métodos empregados no acompanhamento do lodo .....	43
Quadro 3.1: Importância dos macronutrientes para as plantas. ....	82
Quadro 3.1: Importância dos macronutrientes para as plantas (continuação) .....	83
Quadro 3.2 – Importância dos micronutrientes para mudas de espécies florestais .	84
Quadro 3.3 – Deficiências nutricionais observadas em <i>Eucalyptus spp.</i> ....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição típica dos esgotos sanitários .....	12
Tabela 2.2 – Concentrações usuais de organismos patogênicos e indicadores de contaminação em esgotos sanitários .....	14
Tabela 2.3 – Teores de sólidos, carbono e nutrientes encontradas em lodos de esgotos gerados em diferentes processos de tratamento (% matéria seca).....	27
Tabela 2.4 – Características físicas e químicas de biossólidos utilizados em estudos de aplicação florestal (g kg <sup>-1</sup> ) .....	28
Tabela 2.5 - Caracterização agrônômica de lodo tratado por caleação e secagem em estufa.....	28
Tabela 2.6 – Características microbiológicas (organismos patogênicos e indicadores de contaminação) típicas de biossólidos e de lodos de esgotos sanitários .....	29
Tabela 2.7 – Qualidade microbiológica das classes de lodo estabelecidas na Resolução CONAMA 375 / 2006.....	30
Tabela 2.8 – Qualidade microbiológica das classes de lodo estabelecidas na Norma 503 dos Estados Unidos.....	31
Tabela 2.9 – Dados de temperatura (°C) durante os experimentos de higienização do lodo. ....	45
Tabela 2.10 – Caracterização química dos biossólidos produzidos por caleação e secagem em estufa. ....	62
Tabela 2.10 – Caracterização química dos biossólidos produzidos por caleação e secagem em estufa (continuação). ....	62
Tabela 2.11 – Metais presentes no biossólidos produzidos por caleação e secagem em estufa. ....	63
Tabela 3.1 – Proporção de biossólido e de Plantmax nos vários tratamentos, segundo tipo e classe de lodo.....	88
Tabela 3.2 – Caracterização química dos biossólidos produzidos por caleação e secagem em estufa. ....	89
Tabela 3.2 – Caracterização química dos biossólidos produzidos por caleação e secagem em estufa (continuação) .....	89
Tabela 3.3 – Propriedades do substrato Plantamax .....	90
Tabela 3.4 – Características químicas do substrato Plantmax.....	90

Tabela 3.5 – Sobrevivência das mudas de <i>Eucalyptus urophylla</i> 90 dias após a semeadura em casa de vegetação.....	97
Tabela 3.6 – Médias de altura, diâmetro do colo e matéria seca (aérea e raiz) <sup>(1)</sup> aos 90 dias de idade, de acordo com o tratamento.....	98
Tabela 3.7 – Sobrevivência das mudas de <i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i> , 90 dias após estaqueamento em casa de vegetação.....	112
Tabela 3.8 – Médias de altura, diâmetro do colo e matéria seca (aérea e raiz) <sup>(1)</sup> aos 90 dias de idade, de acordo com o tratamento.....	113
Tabela 4.1 – Qualidade da água de lavagem das luvas e do substrato utilizado para crescimento das mudas de eucalipto, Tratamento testemunha (100% Plantmax). 138	
Tabela 4.2 – Qualidade da água de torneira utilizada na lavagem das luvas e no umedecimento do substrato nos tubetes. ....	138
Tabela 4.3 – Qualidade da água de lavagem das luvas e do bio sólido/substrato utilizado para crescimento das mudas de eucalipto, Lodo caledo classe A, 100% de bio sólidos.....	140
Tabela 4.4 – Qualidade da água de lavagem das luvas e do bio sólido/substrato utilizado para crescimento das mudas de eucalipto, Lodo caledo classe A, 50% de bio sólidos. ....	140
Tabela 4.5 – Qualidade da água de lavagem das luvas e do bio sólido/substrato utilizado para crescimento das mudas de eucalipto, Lodo caledo classe B, 100% de bio sólidos.....	141
Tabela 4.6 – Qualidade da água de lavagem das luvas e do bio sólido/substrato utilizado para crescimento das mudas de eucalipto, Lodo caledo classe B, 25% de bio sólidos. ....	141
Tabela 4.7 – Qualidade da água de lavagem das luvas e do bio sólido/substrato utilizado para crescimento das mudas de eucalipto, Lodo de estufa classe A, 100% de bio sólidos.....	143
Tabela 4.8 – Qualidade da água de lavagem das luvas e do bio sólido/substrato utilizado para crescimento das mudas de eucalipto, Lodo de estufa classe A, 75% de bio sólidos.....	144
Tabela 4.9 – Qualidade da água de lavagem das luvas e do bio sólido/substrato utilizado para crescimento das mudas de eucalipto, Lodo de estufa classe B, 100% de bio sólidos.....	144

Tabela 4.10 – Qualidade da água de lavagem das luvas e do biossólido/substrato utilizado para crescimento das mudas de eucalipto, Lodo de estufa classe B, 50% de biossólidos..... 145

## RESUMO

BARONY, Flávio José de Assis, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2011. **Biossólidos: produção, efeitos no crescimento de mudas de eucalipto e avaliação de risco à saúde humana.** Orientador: Rafael Kopschitz Xavier Bastos. Co-orientadores: Paula Dias Bevilacqua e Nairam Félix de Barros.

Este trabalho envolveu a produção de biossólidos a partir do tratamento de lodo de reator UASB por meio de caleação e secagem em estufa, seu uso para produção de mudas de *Eucalyptus urophylla* e a avaliação de risco microbiológico à saúde humano (risco ocupacional) associado à produção das mudas em viveiro. Em experimentos conduzidos na Unidade de Tratamento de Esgotos e Utilização de Efluentes da Viroleira (Viçosa – MG), foram produzidos três lotes de biossólidos visando à obtenção de padrão de qualidade Classes A e B (Resolução CONAMA 375/2006); tendo sido avaliadas as seguintes características: teor de umidade, pH, sólidos totais, ovos viáveis de helmintos, *Salmonella spp.*, coliformes totais e *E. coli*. Com base nos resultados de ovos de helmintos e *E.coli*, o biossólido caleado (adição de 50% de CaO em relação ao peso do lodo em base seca) atingiu padrão Classe B com 12 dias no Lote 1 e sete dias nos lotes 2 e 3; a condição de biossólido Classe A foi alcançada aos 70, 62 e 29 dias, respectivamente, nos lotes 1, 2 e 3. No tratamento em estufa, a Classe B foi alcançada nos lotes 1, 2 e 3 com 42, 35 e 56 dias, respectivamente; a condição de Classe A demandou 100 dias para o Lote 1 e não foi alcançada aos 80 e 62 dias de acompanhamento nos lotes 2 e 3, respectivamente. Em ambos os processos de higienização, não foi viável a manipulação do biossólido antes de 40 dias de armazenamento devido à elevada umidade, o que demandou procedimentos adicionais de condicionamento do biossólido para o plantio de mudas de eucalipto em tubetes. O tratamento do lodo por secagem em estufa resultou em biossólidos com propriedades agrônômicas melhores do que o produzido por caleação. O plantio e o cultivo das mudas de eucalipto foram realizados em instalações (viveiro e casa de vegetação) da Universidade Federal de Viçosa. As mudas de eucalipto foram plantadas em tubetes de

polipropileno, contendo biossólidos (caleado e de estufa, Classes A e B) e substrato Plantmax misturados em diferentes proporções (0, 25, 50, 75 e 100% de biossólidos). Cada tratamento recebeu quatro repetições em parcelas compostas por 10 mudas, as quais foram dispostas em delineamento inteiramente casualizado. Ao todo foram plantadas 800 mudas (2 tipos de biossólidos x 2 classes de biossólidos x 5 proporções biossólidos / substrato x quatro repetições x 10 mudas por repetição). Decorridos 90 dias após o semeio, foram verificados os seguintes parâmetros nas mudas: sobrevivência, altura, diâmetro do colo e massa de matéria seca (aérea e raiz). Em geral, as misturas com 50% biossólidos + 50% substrato Plantmax e, ou com 75% biossólidos + 25% substrato Plantmax proporcionaram os melhores desenvolvimentos das mudas de eucalipto. Em termos gerais, o biossólido produzido em estufa promoveu melhores resultados do que o biossólido caleado. A avaliação quantitativa de risco microbiológico foi realizada com base na construção de cenários de exposição para o uso de biossólidos no cultivo de mudas de espécies arbóreas, tendo sido utilizados os tratamentos com 100% de biossólidos (caleado e seco em estufa, classes A e B) e aqueles que resultaram em maior eficiência agrônômica. Os resultados sugerem que essa atividade implica risco ocupacional (ingestão involuntária de partículas de biossólidos), principalmente risco de infecção helmíntica em atividades continuadas de plantio e transposição das mudas. Pondera-se, entretanto, que em função de limitações e pressupostos assumidos neste estudo, os eventuais riscos possam ter sido superestimados.

## ABSTRACT

BARONY, Flávio José de Assis, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2011. **Biosolids: production, effects on eucalyptus seedlings growth, and assessment of human health risks.** Adviser: Rafael Kopschitz Xavier Bastos. Co-advisers: Paula Dias Bevilacqua and Nairam Félix de Barros.

This work involved the production of biosolids by means of lime treatment and green house drying of UASB reactor sludge, the use of these biosolids to produce *Eucalyptus urophylla* seedlings, and an approach of microbiological risk assessment to estimate human health risks (occupational risks) associated with the production of the seedlings. In trials conducted in an experimental site in Viçosa - MG, three lots of biosolids attaining to Class A and B standard qualities (according to the criteria of the Brazilian regulation on biosolids use in agriculture) were produced, and the following variables were monitored: moisture content, pH, total solids, viable helminth eggs, *Salmonella* spp., total coliforms, and *E. coli*. Based on the results of helminth eggs and *E.coli*, the limed sludge (adding 50% CaO in relation to the sludge dry weight) reached Class B standard within 12 days in Lot 1 and seven days in lots 2 and 3; Class A biosolids was reached after 70, 62 and 29 days respectively in lots 1, 2 and 3. Regarding the green house dried sludge, Class B was achieved in lots 1, 2 and 3 within 42, 35 and 56 days, respectively; Class A standard was achieved only after 100 days in Lot 1 but was not reached after 80 and 62 days in lots 2 and 3, respectively. In both cases (lime and green house treatment) biosolids handling was not feasible before 40 days storage due to high humidity, and this required additional conditioning procedures in order to plant the eucalyptus seedlings in plastic tubes. The sludge drying in the green house resulted in biosolids with better agricultural properties than those produced by lime treatment. The sowing and growth of the eucalyptus seedlings were carried out in nursery and greenhouse facilities at the Federal University of Viçosa. The eucalyptus seedlings were planted in polypropylene tubes containing biosolids (limed and dried, Classes A and B) and Plantmax mixed in different proportions (0, 25, 50, 75 and 100% of

biosolids). Each treatment received four replications in plots with 10 seedlings each, which were arranged in a complete randomized design. Altogether 800 seedlings were planted (2 types of biosolids x 2 classes of biosolids x 5 proportions of biosolids / substrate x 4 replicates x 10 seedlings per replicate). 90 days after sowing, the following parameters were measured in the saplings: survival, height, stem diameter and dry biomass (aerial and root).. In general, the best seedling's developments were obtained with 50% biosolids + 50% Plantmax and/or 75% biosolids + 25% Plantmax. Overall, the biosolids produced in the greenhouse promoted better results than the limed sludge. The quantitative microbiological risk assessment was based on the construction of exposure scenarios for the use of biosolids in the cultivation of tree seedlings, using those treatments with 100% of biosolids (limed and dried, classes A and B) and those that resulted in the highest agronomic yield. The results suggested that this activity involves occupational risk (arising from involuntary ingestion of biosolids particles), in particular risks of helminth infection in continuing activities of seedlings planting and transplanting. However, due to limitations inherent to and some assumptions made in this study, the risks may have been overestimated.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

As estatísticas sobre coleta e tratamento de esgotos sanitários no Brasil ainda revelam um quadro bastante precário, mesmo que melhorias graduais venham sendo registradas. A Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) indica que, em 2008, cerca de 55,2% dos municípios brasileiros tinham serviço de esgotamento sanitário por rede coletora, apenas três pontos percentuais acima do índice verificado em 2000 (52,2%). Entretanto, nos municípios em que o serviço existia, houve, no mesmo período, aumento dos domicílios atendidos, de 33,5% para 44%. Enquanto 19,9 e 35,3% do esgoto coletado eram tratados, respectivamente, em 1989 e 2000, esse percentual saltou para 68,8% em 2008, porém, menos de um terço dos municípios (28,5%) efetuavam o tratamento. Além disso, todas essas estatísticas embutem acentuadas diferenças regionais (IBGE, 2010).

O aumento da cobertura dos serviços de tratamento de esgotos traz, entretanto, outra questão a ser equacionada, já que produção de resíduos sólidos é inerente ao processo de tratamento de esgotos e o tratamento e destino final desses resíduos (lodos de esgotos) podem responder por 20-60% do custo operacional de uma estação de tratamento de esgotos (ETE) (ANDREOLI *et al.*, 2001; LeBLANC *et al.*, 2006).

Nos Estados Unidos, estima-se que em 2004 foram produzidas aproximadamente 7,2 milhões de toneladas de lodo de esgotos (base seca), provenientes de cerca de 16.600 ETES (NEBRA, 2007). Na Europa, o lodo total produzido em 2005 era estimado em torno de 10 milhões de toneladas (base seca) (IRANPOUR, 2004; FYTILI e ZABANIOTOU, 2006) e, no Reino Unido, 1,5 milhões de toneladas (LeBLANC *et al.*, 2006). Em um dos poucos estudos disponíveis no Brasil, Machado *et al.* (2004), com

base em banco de dados de 275 ETEs tratando esgotos de aproximadamente 12,8 milhões de habitantes, estimaram que 151.700 toneladas de lodo (base seca) são produzidas por ano, o que corresponde à média per capita de 33 gramas por dia.

Em função dos custos do gerenciamento, dos problemas ambientais da disposição inadequada e da regulamentação cada vez mais rigorosa, cresce também o interesse pelo uso benéfico do lodo de esgotos, principalmente a disposição no solo. Em 2004, mais da metade do lodo produzido nos EUA (55%) era aplicado em atividades agrícolas, silvicultura e recuperação de áreas degradadas; dos restantes 45%, 63% era disposto em aterros sanitários e 33% era incinerado. Na União Européia, estimativas para 2010 indicavam que 45% do lodo gerado seriam utilizados na agricultura, 18% dispostos em aterros sanitários e 23% incinerados. No Reino Unido, de acordo com dados de 2005, 67% eram utilizados na agricultura, 1,5% dispostos em aterros sanitários e 19,5% incinerados (LeBLANC *et al.*, 2006).

A PNSB revela ainda que 1.383 distritos brasileiros contavam com tratamento de esgotos em 2000, sendo que em 759 não existia tratamento do lodo gerado. Com relação ao destino do lodo, dentre esses 1.383 distritos apenas em 165 se registrava algum tipo de reaproveitamento (169 municípios em 2008), em 334 distritos o lodo era encaminhado para aterro sanitário (452 municípios em 2008), em 12 o lodo era incinerado (19 municípios em 2008) e o restante tinha destinos tais como: rio (271 distritos em 2000 e 163 municípios em 2008), mar (10 distritos em 2000 e 1 município em 2008), terreno baldio (102 distritos em 2000 e 97 municípios em 2008), “outro destino” (384 distritos em 2000 e 318 município em 2008) ou “sem declaração” (151 distritos em 2000) (IBGE, 2002; IBGE, 2010). Ou seja, o quadro pouco se alterou em oito anos.

Enfim, o quadro atual brasileiro, ainda bastante precário em termos de tratamento e manejo de esgotos e de lodo de esgotos, pode ser revertido de forma promissora se todos os atrativos e vantagens do uso

benéfico dos lodos de esgotos forem considerados. E, nesse sentido, vários estudos no Brasil comprovam a eficácia do uso de lodos de esgotos como fonte de nutrientes para culturas florestais ou agrícolas, ou como condicionador de solos (BERTON *et al.*, 1989; ROCHA *et al.*, 2004; LEMAINSKI e SILVA, 2006; NOGUEIRA *et al.*, 2006; GODOI *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 2008). No Brasil, o plantio de eucalipto no solo atingiu a marca de 6.126.000 ha em 2008 (ABRAF, 2009); esses dados, em si, sugerem o grande potencial de aplicação de lodo de esgotos para uso florestal. Aliás, o uso de lodo de esgotos na cadeia produtiva do eucalipto tem sido já objeto de intensas pesquisas no Brasil (VAZ e GONÇALVES, 2002; TRIGUEIRO e GUERRINI, 2003; GUEDES *et al.*, 2006; GARCIA *et al.*, 2010).

Embora trabalhos de natureza econômica sejam escassos, Trigueiro e Guerrini (2003) ao produzir mudas de eucalipto com uso de biossólido consorciado com casca de arroz carbonizado, citam ganhos econômicos e produtivos significativos e economia de 64% em relação ao fertilizante comercial. Corrêa e Corrêa (2001) ressaltam que a apropriação econômica do uso da produção e uso dos biossólidos é complexa, pois envolve uma série de custos e benefícios econômicos a serem mensurados e que a consolidação de um mercado estruturado de biossólidos exige o crescimento da demanda por esses produtos. Apesar dessas ressalvas os autores, utilizando método de mercado de bens substitutos para a valoração de biossólidos como fontes de nitrogênio, fósforo e matéria orgânica, estimaram que o lodo fresco atingiu R\$ 22,00 por tonelada (estimativas de 2001) e que os processos de estabilização / higienização empregados foram capazes de elevar esse valor entre 35%-620%. Canziani *et al.* (1999) quantificaram custos para produção do lodo caçado na ETE Belém, em Curitiba, que produzia, à época, 80 t d<sup>-1</sup>. O custo total (variável mais fixo) por tonelada foi estimado em R\$7,40, sendo que o transporte e a disposição/incorporação no solo agregaram, respectivamente, R\$6,00 e R\$1,48 por tonelada, perfazendo um total de R\$14,88 por tonelada para disposição final do lodo na agricultura. O custo para a companhia de saneamento representaria 2,84% sobre o montante

arrecadado pela ETE (na forma de tarifa), estimando-se que se os custos fossem repassados aos consumidores, haveria acréscimo de 1,8 centavos por metro cúbico na tarifa de esgoto.

Porém, em que pese os atrativos econômicos e ambientais do uso agrícola ou florestal de lodos de esgotos, aspectos de saúde pública não podem ser negligenciados já que o lodo pode conter diversos contaminantes químicos e microbiológicos e implicar risco à saúde do consumidor ou risco ocupacional. Isso é usualmente tratado na forma de regulamentação, impondo, de forma associada, padrões de qualidade de lodo tratado e limitações de uso. No Brasil, a norma que disciplina o uso agrícola de lodos de esgoto é a Resolução CONAMA nº 375/2006 (BRASIL, 2006). Para o uso em pastagens e culturas comestíveis são estabelecidas exigências rigorosas em termos de tratamento, qualidade e critérios de aplicação do lodo. O uso de lodos de classe inferior em termos de qualidade microbiológica é restrito ao cultivo de café, silvicultura e culturas para produção de fibras e óleos, acompanhado também de exigências bastante rigorosas de critérios de aplicação, ao ponto da permissão de uso estar sujeita a suspensão a menos que evidências epidemiológicas ou estudos de avaliação de risco comprovem segurança sanitária. Entretanto, alguns estudos têm criticado normas vigentes em diferentes países, incluindo o Brasil, como excessivamente rigorosas e, ou desprovidas de fundamentação em avaliação de risco à saúde (GALE, 2005; EISENBERG *et al.*, 2008; BASTOS *et al.*, 2009, NAVARRO *et al.*, 2009).

Por fim, é pertinente esclarecer que se usa aqui a terminologia já consagrada na literatura nacional e internacional. Lodo de esgotos se refere ao resíduo sólido, semisólido ou líquido gerado durante o tratamento de esgotos domésticos; biossólidos, ao lodo que foi suficientemente processado a fim de permitir, de forma segura, sua reciclagem, com o intuito de melhorar e manter, de maneira sustentável, a produtividade dos solos e estimular o crescimento de plantas. O termo biossólidos objetiva, assim, destacar o potencial uso benéfico de aproveitamento da matéria

orgânica, nutrientes, umidade e, ou outras qualidades que esse material possa conter, ao invés de ser visto apenas como resíduo a ser disposto, por exemplo, por incineração ou em aterro sanitário (NEBRA, 2008).

O presente trabalho traz contribuições à demonstração da viabilidade do uso florestal de biossólidos, em particular na produção de mudas de eucalipto; viabilidade e oportunidade, haja vista a importância econômica do cultivo do eucalipto no Brasil e da dimensão ambiental do problema do lodo de esgotos. O trabalho traz também a abordagem da avaliação quantitativa de risco microbiológico, como contribuição à discussão sobre o eventual risco ocupacional associado à produção de mudas de espécies arbóreas em viveiros.

Optou-se por organizar esta dissertação em capítulos. Além desse capítulo introdutório, os demais trazem informações específicas (incluindo revisão de literatura, objetivos, metodologia e resultados e discussão) dos seguintes tópicos: (i) Capítulo 2, onde são apresentados os estudos realizados sobre a produção de biossólidos por meio de dois processos de tratamento de lodo (caleação e secagem em estufa); (ii) Capítulo 3, onde são apresentados e discutidos os resultados dos experimentos de uso desses biossólidos, em diferentes proporções, na produção de mudas de eucalipto em viveiro; (iii) Capítulo 4, onde é discutida a questão do risco (ocupacional) à saúde associado ao manuseio do biossólidos na produção de mudas.

## **Referências**

ABRAF - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. *Anuário estatístico da ABRAF 2009 – ano base 2008*. Brasília, DF: ABRAF, 2009. 120 p. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF09-BR.pdf>>. Acesso: 30 Out. 2009.

ANDREOLI, C. V.; von SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.) *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2001. 484 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, 6).

BASTOS R. K. X, BEVILACQUA P. D.; DIAS, G. M. F.; BARONY, F. J. A. Análise crítica da legislação brasileira para uso agrícola de lodos de esgotos na perspectiva da avaliação quantitativa de risco microbiológico. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, v.2, n.1, p. 143-149, 2009.

BERTON, R.S.; CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S. Absorção de nutrientes pelo milho em resposta à adição de lodo de esgoto a cinco solos paulistas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.13, n.2, p. 187-192, 1989.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 375 de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília, DF: *Diário Oficial da União*, 30 ago. p.141-146. 2006.

CANZIANI, J. R. F.; OSAKI, M.; MASSARDO, M.; PEGORINI, E.S. Análise econômica para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto da ETE-Belém. Curitiba. *Sanare*. v. 11, n.11, p. 51-58, 1999.

CORRÊA, R. S.; CORRÊA, A. S. Valoração de biossólidos como fertilizantes e condicionadores de solos. *Sanare*, v.16, n. 2, p. 49-56, 2001.

EISENBERG, J.N.S.; MOORE, K.; SOLLER, J.A.; EISENBERG, D.; COLFORD, J.M. Microbial risk assessment framework for exposure to amended sludge projects. *Environmental Health Perspectives*, v.116, n.6, p.727-33, 2008.

FYTILI, D.; ZABANIOTOU, A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.12, p. 116–140, 2008.

GALE, P. Land application of treated sewage sludge: quantifying pathogen risks from consumption of crops. *Journal of Applied Microbiology*, v.98, n.2, p.380-96, 2005.

GARCIA, G. O.; GONÇALVES, I. Z.; MADALÃO, J. C.; NAZÁRIO, A. A.; REIS, E. F. Crescimento de mudas de eucalipto submetidas à aplicação de biossólidos. *Revista Ciência Agronômica*, v. 41, n. 1, p. 87-94, 2010.

GODOI, E. L.; BORGES, J.D.; XIMENES, P. A.; LEANDRO, W. M. Produtividade de *Stylosantes guianensis* em resposta ao efeito residual de biossólido em área degradada. *Pesquisa Agropecuária Tropical* v. 38, n. 3, p. 158-163, 2008.

GUEDES, M. C.; ANDRADE, C. A.; POGGIANI, F.; MATTIAZZO, M. A. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, n. 2, p. 267-280, 2006.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000*. Rio de Janeiro: IBGE, 2002, 397p. Disponível em:

<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb/pnsb.pdf>>. Acesso em 01 Nov. 2009.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008*. Rio de Janeiro: IBGE, 2010, 219p. Disponível em:

<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb/pnsb.pdf>>. Acesso em 01 Nov. 2010.

IRANPOUR, R.; COX, H. H. J.; KEARNEY, R. J.; CLARK, J. H.; PINCINCE, A. B.; DAIGGER, G. T. Regulations for biosolids land Application in U.S. and European Union. *Journal of Residuals Science & Technology*, v. 1, n. 4, p. 209-222, 2004.

LeBLANC, R. J.; MATTHEWS, P.; RICHARD, R. P. *Global atlas of excreta, wastewater sludge and biosolids management. Moving towards the sustainable and welcome uses of a global resource*. Nairobi: UN Habitat, 632p. 2006.

LEMAINSKI, J.; SILVA, J. E. Utilização do bio sólido da CAESB na produção de milho no Distrito Federal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, n. 4, 0p741-750, 2006.

MACHADO, M.F.S.; FIGUEIREDO, R.F.; CORAUCCI FILHO, B. Produção brasileira de lodos de esgotos. *Sanare - Revista Técnica da Sanepar*, v.22, n.22, p.66-74, 2004.

NAVARRO, I; JIMÉNEZ, B; CIFUENTES, E; LUCARIO, S. A. Quantitative microbial risk assessment of helminth ova in reusing sludge for agricultural production in developing countries. *Journal of Water and Health*, v. 7, n.1, p 31-44, 2009.

NEBRA - NORTH EAST BIOSOLIDS AND RESIDUALS ASSOCIATION. *A national biosolids regulation, quality, end use and disposal survey. Final report*. Tamworth: Nebra, 34p. 2007.

NEBRA - NORTH EAST BIOSOLIDS AND RESIDUALS ASSOCIATION. *Information update: official usage of the term "biosolids"*. Tamworth, 2008. 7 p. Disponível em: <<http://www.nebiosolids.org/uploads/pdf/Biosolids-theWord-NEBRA08.pdf>>. Acesso em: 2 nov 2009

NOGUEIRA, T. A. R.; SAMPAIO. R. A.; FERREIRA, C. S.; FONSECA, I. M.; FERNANDES, L. A. Produtividade de milho e de feijão consorciados adubados com diferentes formas de lodo de esgoto. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, v.6, n. 1, p. 52-63, 2006.

ROCHA, G. N.; GONÇALVES; J. L. M.; MOURA, I. M. Mudanças da fertilidade do solo e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com bio sólido. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, n. 4, p. 623-639, 2004.

SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. Volume de madeira e concentração foliar de nutrientes em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis* fertilizadas com lodos de esgoto úmido e seco. *Revista. Árvore*, v.32, n.5, p.845-854, 2008.

TRIGUEIRO, R. M.; GUERRINI, I. A. Uso de biossólido como substrato para produção de mudas de eucalipto. *Scientia forestalis.*, n.64, p. 150-162. 2003.

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

## CAPÍTULO 2

### PRODUÇÃO DE BIOSSÓLIDOS PARA USO FLORESTAL

#### 2.1. Introdução

Como destacado no capítulo introdutório, o termo bioossólidos foi cunhado para diferenciá-los, com conotação positiva, do lodo de esgotos. Bioossólidos são, portanto, os lodos de esgotos tratados de forma a propiciar seu uso benéfico.

A composição física, química e microbiológica e, conseqüentemente, o potencial e as limitações do uso dos bioossólidos, dependerão da composição do material de origem (os esgotos sanitários) e dos processos de tratamento de esgotos e de lodos de esgotos.

Esgoto sanitário é um termo amplo e pode se referir aos esgotos domésticos (de composição essencialmente orgânica) ou aos esgotos urbanos, os quais, dependendo do ambiente urbano em questão podem incluir efluentes outros, como os industriais. Assim, os esgotos sanitários podem conter nutrientes a serem aproveitados, por exemplo, em uso agrícola ou florestal, mas também contaminantes microbiológicos e químicos que podem limitar tais usos. O esgoto doméstico bruto é constituído por 99,9% de água e 0,1% de matéria sólida (METCALF e EDDY, 2003). Não obstante a proporção minoritária de material sólido, os processos de tratamento de lodo geram volumes consideráveis de lodo nas etapas de separação de fases líquido-sólido, as quais, além disso, promovem a concentração no lodo dos constituintes dos esgotos.

O tratamento do lodo, dependendo de suas características e da destinação pretendida, incluirá etapas de desaguamento, estabilização e higienização. Para ser considerado bioossólido apto a aplicação no solo, em geral, o lodo deve ser estabilizado (para evitar atração de vetores e

geração de maus odores) e higienizado (para efeito de mitigação de riscos à saúde), além de não conter (ou conter em níveis seguros) contaminantes químicos.

A crescente geração de lodos de esgotos na sociedade contemporânea impõe desafios técnicos e gerenciais para o adequado destino final desse resíduo do tratamento dos esgotos. Assim, em paralelo ao crescimento da produção de lodo de esgotos em todo o mundo, também vem crescendo o interesse pelo uso benéfico dos biossólidos, o que, desde a ótica da proteção ambiental e da saúde pública, já é objeto de regulamentação em diversos países (LeBLANC *et al.*, 2006).

Normas de aplicação de lodo de esgotos ou biossólidos no solo em geral incluem um ou mais dos seguintes elementos: especificação de técnicas de tratamento do lodo, níveis máximos de contaminantes (constituintes químicos e microbiológicos) e restrições de uso. Muitas vezes são estabelecidas classes ou categorias de biossólidos, com qualidade compatível com os usos associados. Naturalmente, aos usos mais permissíveis, como o uso agrícola em culturas comestíveis, correspondem critérios mais restritivos. Em contrapartida, o uso em recuperação de áreas degradadas ou em plantios florestais traz, intrinsecamente, menores riscos à saúde e, assim, as exigências de qualidade são, em geral, menores.

Na revisão de literatura deste capítulo são abordados, muito brevemente, aspectos dos processos de tratamento de esgotos e da geração de lodo. Discorre-se, também brevemente, sobre os processos de tratamento do lodo de esgotos, com ênfase nos processos de higienização empregados no presente estudo: caleação e secagem em estufa agrícola. São também discutidas as características dos lodos de esgotos e dos biossólidos, tendo em vista sua aplicação florestal. Por fim, são enfocados aspectos de regulamentação do uso dos biossólidos, com destaque para as regras vigentes no Brasil.

O capítulo apresenta ainda os resultados dos experimentos realizados para a produção de biossólidos, por meio de caleação e secagem em estufa, tendo em vista o uso florestal.

## 2.2. Revisão de literatura

### 2.2.1. Características dos esgotos sanitários

Como as características do lodo de esgoto dependem em primeira instância da água residuária de origem, cabe destacar algumas das características dos esgotos sanitários, o que se faz a seguir em texto baseado, essencialmente, em Bastos *et al.* (2003a), Bastos *et al.* (2003b) e von Sperling (2005).

A composição dos esgotos sanitários é resultado da dieta humana e das atividades domiciliares e são relativamente mais diluídos que a maioria dos efluentes industriais e agroindustriais em função da intensa utilização de água no meio urbano e domiciliar. Na Tabela 2.1 são apresentadas algumas características físicas e químicas típicas dos esgotos sanitários.

Tabela 2.1 - Composição típica dos esgotos sanitários

Parâmetro	Unidade	Concentração
DBO	mg L <sup>-1</sup>	250 - 400
DQO	mg L <sup>-1</sup>	500 - 800
N-org.	mg L <sup>-1</sup>	15 - 30
N-NH <sub>3</sub>	mg L <sup>-1</sup>	20 - 40
N-NO <sub>3</sub>	mg L <sup>-1</sup>	≈ 0
P-org.	mg L <sup>-1</sup>	2 - 8
P- inorg.	mg L <sup>-1</sup>	4 - 17
K	mg L <sup>-1</sup>	≈ 30
Sólidos totais	mg L <sup>-1</sup>	≈ 1.000
Sólidos voláteis	mg L <sup>-1</sup>	≈ 700
Sólidos fixos	mg L <sup>-1</sup>	≈ 300
Na	mg L <sup>-1</sup>	40 - 150
Ca	mg L <sup>-1</sup>	50 - 70
Mg	mg L <sup>-1</sup>	≈ 30
Condutividade elétrica	dS/m	0,7 - 1,5
Cl <sup>-</sup>	mg L <sup>-1</sup>	≈ 150
SO <sub>4</sub>	mg L <sup>-1</sup>	60 - 100
Alcalinidade	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	100 - 200

Fonte: adaptado de von Sperling (2005)

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é a medida da quantidade de oxigênio necessária para a estabilização bioquímica da matéria orgânica presente em uma amostra, sendo, portanto, uma medida indireta da matéria orgânica biodegradável sob condições padronizadas (20°C, cinco dias) e representa uma fração da matéria carbonácea (cerca de 2/3).

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é usada como medida do oxigênio requerido para estabilização da matéria orgânica contida em uma amostra, suscetível à oxidação por um oxidante químico forte. É também uma medida indireta da quantidade de matéria orgânica e se aproxima, mais que a DBO, da quantidade total. Genericamente, se pode afirmar que quanto mais próxima da unidade a relação DQO/DBO, mais biodegradável é a amostra.

Sólidos voláteis e fixos referem-se às frações orgânicas e inorgânicas dos sólidos presentes em uma amostra, as quais nos esgotos sanitários correspondem à cerca de 70 e 30% dos sólidos totais, respectivamente.

Os esgotos sanitários são, em geral, ricos em matéria orgânica e macronutrientes (N, P, K). Por outro lado, o uso domiciliar da água pode acrescentar elevados teores de sais, resultado também da própria dieta humana e da intensa utilização de produtos de limpeza; portanto, os esgotos sanitários tendem a apresentar valores relativamente elevados de condutividade elétrica, Na e cloretos.

O nitrogênio orgânico é encontrado em diversos compostos, tais como uréia, proteínas, ácidos nucleicos. No ciclo do nitrogênio a amônia é produzida, principalmente, a partir da desaminação de compostos orgânicos e da hidrólise da uréia. Em ambientes aeróbios ocorre a nitrificação, ou oxidação bioquímica (mineralização), das formas de nitrogênio, de amônia a  $\text{NO}_3^-$ ; em ambientes anaeróbios ocorre a desnitrificação, ou redução das formas de nitrogênio, de  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{N}_2$ . No

esgoto bruto (sem tratamento), em geral, predominam o nitrogênio orgânico e a amônia e a concentração de nitrato é baixa. À exceção de alguns processos aeróbios com elevada capacidade de nitrificação, o nitrogênio nos esgotos tratados tende também a se apresentar predominantemente nas formas orgânica e amoniacal. Efluentes anaeróbios tendem a apresentar proporções de N-NH<sub>3</sub>/N-org mais elevadas que no esgoto bruto (porém, com concentrações ainda relativamente elevadas de N-org), como resultado da amonificação verificada nos reatores anaeróbios.

O fósforo se apresenta em concentrações inferiores às de N e de K, nas formas orgânicas ou inorgânicas, solúveis (matéria orgânica dissolvida ou sais de fósforo) ou particuladas (biomassa ou compostos minerais), preponderando os fosfatos (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>).

Em se tratando de esgotos domésticos, os metais pesados podem não constituir problema maior. Oligoelementos podem estar presentes em concentrações que satisfaçam à demanda nutricional de muitas culturas, mas não necessariamente de forma balanceada. Por outro lado, os esgotos sanitários podem conter variados microrganismos patogênicos (Tabela 2.2) e, conseqüentemente, o lodo de esgotos poderá também conter concentrações elevadas de patógenos e sua utilização deverá observar aspectos de proteção à saúde.

Tabela 2.2 – Concentrações usuais de organismos patogênicos e indicadores de contaminação em esgotos sanitários

<b>Organismo</b>	<b>Concentração</b>
<i>Escherichia coli</i>	10 <sup>6</sup> - 10 <sup>8</sup> / 100 mL
<i>Salmonellae</i> spp.	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>3</sup> / 100 mL
Cistos de <i>Giardia</i> spp.	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>4</sup> / L
Oocistos de <i>Cryptosporidium</i> spp.	10 <sup>1</sup> - 10 <sup>2</sup> / L
Ovos de helmintos	10 <sup>1</sup> - 10 <sup>3</sup> / L
Vírus	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>5</sup> / L

Fonte: Bastos *et al.* (2003c)

### **2.2.2. Produção de lodo em processos de tratamento de esgotos**

A produção e as características do lodo gerado dependem do processo de tratamento de esgotos e do intervalo de remoção de lodo do sistema. Por isso, discorre-se a seguir, ainda que brevemente, sobre alguns dos principais processos de tratamento de esgotos empregados no Brasil e sobre algumas de suas características que influenciam a produção e a composição do lodo. As principais referências utilizadas no desenvolvimento do texto a seguir são: von Sperling (2005) e von Sperling e Gonçalves (2001).

O tratamento dos esgotos é usualmente classificado de acordo com os seguintes níveis: preliminar, primário, secundário, terciário. O tratamento preliminar constitui condicionamento prévio ao tratamento propriamente dito. Pretende-se remover elementos estranhos à composição natural das águas residuárias e sólidos grosseiros, em geral inertes (ex. areia, cabelos).

O tratamento primário visa à remoção de sólidos ainda de grandes dimensões, sedimentáveis. No tratamento secundário, em reatores biológicos, ocorre a remoção de matéria orgânica de maneira mais efetiva e, eventualmente, de nutrientes. O tratamento terciário objetiva a remoção de constituintes específicos (ex. substâncias tóxicas ou compostos não biodegradáveis) ou a remoção complementar (polimento dos efluentes) de constituintes ou contaminantes não removidos no tratamento secundário, mais especificamente, nutrientes e organismos patogênicos. O tratamento terciário pode envolver processos físicos e químicos como a precipitação química, a filtração e a desinfecção.

Os arranjos denominados convencionais usualmente incluem decantadores primários (onde é gerado o lodo primário), reatores biológicos (por exemplo, lodos ativados e filtros percoladores) e decantadores secundários, onde é removido o lodo secundário, constituído, essencialmente, pela biomassa formada nos reatores

biológicos. Nesses tipos de sistema o lodo gerado é removido de forma praticamente contínua e, por conseguinte, é pouco adensado (1-4% de sólidos secos) e necessita passar por processo de estabilização. Nesses sistemas, o lodo primário e o secundário são geralmente tratados, conjuntamente, em digestores. Esses processos de tratamento geram em torno de 1,5 a 8 litros de lodo por habitante por dia ou, em termos de massa, 60-80 gramas de sólidos suspensos (SS) por habitante por dia (von SPERLING e GONÇALVES, 2001)

Outras técnicas de tratamento, denominadas simplificadas (ou não mecanizadas), tais como as lagoas de estabilização e os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (ou reatores UASB, do inglês *upflow anaerobic sludge blanket*) (Figura 2.1), encontram grande aplicação no Brasil devido à simplicidade e baixo custo operacional e adequação a climas quentes. As lagoas de estabilização apresentam como grande diferencial em relação a vários outros processos de tratamento o fato de que o lodo, decantado, permanece armazenado por longos períodos de tempo (anos) e, por isso, quando de sua remoção o grau de adensamento e estabilização é elevado. Em termo de produção volumétrica e mássica de lodo as lagoas geram cerca de  $0,15 - 0,45 \text{ L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$  e  $25 - 55 \text{ g SS hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$  (von SPERLING e GONÇALVES, 2001)

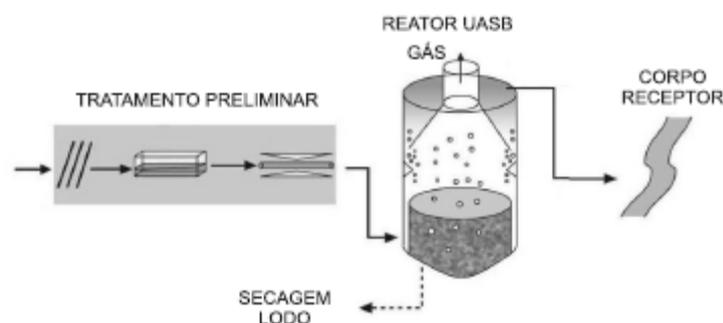


Figura 2.1 – Ilustração esquemática de um reator UASB

Fonte: von Sperling (2005)

Nos reatores UASB o fluxo é ascendente, com um sistema de separação trifásico na parte superior que possibilita a separação do gás (que pode ser captado e aproveitado) da fase líquida (efluente tratado) e a

sedimentação dos sólidos no interior do reator. Os sólidos acumulados formarão a manta de lodo e, na parte inferior, o leito de lodo, mais concentrado. O fluxo ascendente promove agitação das partículas do meio e contato entre a biomassa e o substrato do lodo, favorecido ainda pela mistura provocada pelas bolhas de gás (CHERNICHARO, 2007). Periodicamente deve ser feito o descarte do lodo do reator de forma a manter o adequado equilíbrio entre a biomassa e o aporte de substrato e isso é realizado em intervalos de semanas. Apesar do período de permanência do lodo nos reatores UASB ser bem inferior ao das lagoas de estabilização, o lodo descartado já é digerido (3-6% de sólidos secos) e bem adensado, requerendo apenas o desaguamento, por exemplo, em leitos de secagem. Cabe também registrar que processos anaeróbios geram quantidades bem menores de lodo do que os processos aeróbios. No caso dos reatores UASB, a produção gira em torno de 0,2-0,6 L.hab<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> e 12-18 g SS hab<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> (von SPERLING e GONÇALVES, 2001)

### **2.2.3. Processos de tratamento de lodos de esgotos**

Em termos gerais, o tratamento do lodo de esgotos inclui uma ou mais das seguintes etapas: (i) adensamento; (ii) estabilização; (iii) condicionamento; (iv) desidratação e (v) higienização (von SPERLING e GONÇALVES, 2001).

A incorporação dessas etapas no tratamento do lodo dependerá do tipo de tratamento de esgotos empregado e, por conseguinte, das características do lodo gerado, bem como do destino final pretendido para o lodo.

Como resumido por Gonçalves *et al.* (2001a), o adensamento visa reduzir a umidade do lodo e, portanto, o volume, facilitando as etapas subsequentes do tratamento. É mais utilizado nos processos de tratamento primário, lodos ativados e filtros percoladores, tendo importantes implicações no dimensionamento e operação dos digestores. Pode ser

realizado em adensadores por gravidade (similares aos decantadores), por flotação por ar dissolvido ou em centrífugas.

A estabilização visa à mineralização da matéria orgânica biodegradável com o objetivo de atenuar os inconvenientes de maus odores e de atração de vetores no tratamento e no manuseio do lodo. Conforme Fernandes (2000), o conceito de estabilização é amplo e dentre os parâmetros que podem ser usados para mensurar o lodo estabilizado encontram-se: odor; redução de sólidos voláteis, teor de cinzas (sólidos fixos), DBO, DQO, carbono orgânico total (COT); teor de nitrogênio (amoniacoal e nítrico) e de ortofosfatos. A estabilização pode ser realizada por meio de processos biológicos (em digestores aeróbios ou anaeróbios, ou por compostagem), químicos (mediante a adição de oxidantes ou alcalinizantes) ou térmicos (adição de calor) (LUDIVICE, 2001).

A regulamentação do estado do Paraná define lodo digerido como aquele cuja biodegradação foi realizada por processos aeróbios ou anaeróbios, com redução de sólidos em suspensão voláteis (SSV) superior a 40%; estabelece ainda que para fins de utilização agrícola o grau de estabilidade dos biossólidos deverá ser avaliado através do teor de cinzas do material, devendo ser superior a 29% (IAP, 2003). A Resolução CONAMA N° 375 / 2006, que define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto, estabelece que concentração de sólidos voláteis (SV) deve ser reduzida em 38% ou mais para que o lodo seja considerado estabilizado por digestão aeróbia ou anaeróbia (BRASIL, 2006).

O condicionamento é uma forma de preparação do lodo, através da adição de produtos químicos (coagulantes ou polieletrólitos), com vistas a aperfeiçoar os processos de desaguamento. Por exemplo, lodos descartados de processos de lodos ativados dificilmente podem ser concentrados a teores de sólidos superiores a 4-6% de ST sem condicionamento prévio (GONÇALVES *et al.*, 2001a).

O desaguamento ou desidratação é, em geral, realizado entre os processos de estabilização e higienização ou o destino final, e tem como objetivo ganho de operacionalidade e redução de custos de manejo e transporte. Refere-se, portanto, aos processos de remoção de umidade do lodo digerido. A seleção do processo de desidratação depende do tipo de lodo e da área disponível. Os principais processos utilizados para a desidratação do lodo são os leitos de secagem, lagoas de lodos (processos naturais), os quais produzem lodo com cerca de 40% de sólidos secos, além das centrífugas (produção de lodo com 20-30% de sólidos secos), prensas desaguadoras, filtros à vácuo e filtros-prensa (processos mecânicos), capazes de produzir lodo com com 40-45 % de sólidos secos. Para ETEs de pequeno porte localizadas em regiões onde não haja restrição de disponibilidade de área, processos naturais são considerados opções adequadas. Por sua vez, ETEs de maior porte tendem a utilizar desidratação mecânica (von SPERLING e GONÇALVES, 2001).

A higienização, ou desinfecção, visa à remoção de organismos patogênicos e constitui etapa indispensável quando se pretenda a reciclagem (agrícola ou florestal, por exemplo) do lodo. Algumas das técnicas de estabilização atuam também na higienização do lodo. A Resolução CONAMA N° 375/2006 lista os seguintes processos de estabilização e, ou higienização e de redução de atratividade de vetores (os quais têm explicitamente como referência a regulamentação dos Estados Unidos), acrescentando que “outros poderão ser propostos, desde que haja comprovação de sua eficiência e seja aceito pelo órgão ambiental” (BRASIL, 2006).

Processos de redução significativa de patógenos: digestão aeróbia ou anaeróbia, secagem em leitos de areia ou em bacias, pavimentadas ou não, compostagem, estabilização com cal.

Processos de redução adicional de patógenos: compostagem confinada ou em leiras aeradas, secagem térmica, tratamento térmico, digestão aeróbia

termofílica, processos de irradiação com raios beta, processos de pasteurização.

Processos para redução da atratividade de vetores: digestão anaeróbia, digestão aeróbia, compostagem, estabilização química, secagem, aplicação subsuperficial e incorporação no solo.

Duas técnicas de higienização de lodos serão destacadas a seguir, por terem sido as empregadas no presente trabalho – a caleação e a secagem em estufa agrícola (ou solarização). Ambas são caracterizadas pelo baixo custo e simplicidade operacionais.

#### **2.2.3.1. Caleação**

A adição de produtos químicos alcalinos tem efeito estabilizante e desinfetante sobre o lodo de esgoto. Das três substâncias químicas usualmente utilizadas para a estabilização alcalina (CaO, Ca(OH)<sub>2</sub>, e cinza), somente a cal virgem (CaO) sofre reação de hidratação, que produz calor (reação exotérmica) e elevação da temperatura do lodo, promovendo a higienização (GIROVICH, 1996). Contudo, a inativação de organismos patogênicos, além do efeito da temperatura, é também resultado, conjunto, da elevação do pH e dos efeitos da amônia (PECSON *et al.*, 2007).

Em resumo, a adição de cal promove os seguintes efeitos: (i) redução de sólidos voláteis (10-35%), devido à perda de orgânicos voláteis para a atmosfera; (ii) aumento de sólidos totais, resultantes da adição de sólidos da cal e da precipitação de sólidos dissolvidos; (iii) redução nos níveis de fósforo solúvel devido à reação com ortofosfatos para formar precipitados de fosfato de cálcio; (iv) fixação de metais pesados; e (v) perdas de nitrogênio por volatilização da amônia (TSUTIYA *et al.*, 2001; ANDREOLI *et al.*, 2001).

A homogeneização da mistura da cal com o lodo, aliada às condições de umidade do lodo, são condições básicas para se obter higienização adequada. A experiência brasileira indica que a adição de cal virgem (CaO) ou cal hidratada [Ca(OH)<sub>2</sub>] deve ser realizada em lodo com teor de umidade entre 60 e 75%, em proporções que variam de 30% a 50% do peso seco do lodo (ANDREOLI *et al.*, 2001). A cal virgem é o produto mais indicado para aplicação em lodo na fase sólida pela sua capacidade de reagir com a umidade e liberar calor (PINTO, 2001).

Após a mistura com a cal, o lodo deve permanecer coberto por 60-90 dias para que se complete a higienização. Esse procedimento tem por finalidade evitar o contato com águas de chuva e reduzir a perda de calor; nesse período o pH deve ser mantido em valores próximos a 12 (PINTO, 2001). Segundo Comparini (2001), a estabilização alcalina pode ser considerada um processo de redução adicional de patógenos, desde que ocorra com manutenção do pH acima de 12 e de temperatura superior a 52°C por ao menos 72 horas, seguida de secagem até atingir no mínimo 50% de sólidos totais. Andreoli *et al.* (2001) indicam que a adição de 50% de lodo demanda menor tempo para higienização, podendo atingir qualidade de lodo Classe A (ver item 2.2.5) em 60 dias.

A mistura da cal com o lodo pode ser feita de maneira simplificada e por bateladas (manual, betoneira) ou de maneira contínua com equipamentos industriais (ANDREOLI *et al.*, 2001).

A caleação pode, entretanto, trazer alguns inconvenientes, tais como odores causados pela volatilização da amônia e acréscimo de sólidos para transporte e disposição. Do ponto de vista agrônomo, a perda de nutrientes e a elevação do pH podem constituir limitações. Em relação ao pH, a Resolução CONAMA nº 375/2006 determina que “o cálculo da taxa de aplicação máxima anual deverá levar em conta os resultados dos ensaios de elevação de pH provocado pelo lodo de esgoto ou produto derivado no solo predominante na região de modo a garantir

que o pH final da mistura solo-lodo de esgoto ou produto derivado não ultrapasse o limite de 7” (BRASIL, 2006).

Fernandes *et al.* (1996) também encontrou excelentes resultados com lodo caleado a 50% do peso seco, obtendo após 20 dias de contato com pH 12 remoção ‘total’ de coliformes totais, coliformes termotolerantes, *Salmonella*, estreptococos, larvas de helmintos e cistos de protozoários, além de remoção de 77,3% dos ovos de helmintos, sendo que os remanescentes eram inviáveis.

Godinho (2003) verificou a sobrevivência e viabilidade de ovos de *Ascaris* sp. em lodos higienizados por caleação e por tratamento térmico. Para o experimento de caleação, o lodo foi obtido de um reator UASB em escala de demonstração, após etapa de desaguamento em leito de secagem, tendo sido testadas três dosagens de cal hidratada (30, 40 e 50%). Os experimentos de tratamento térmico foram realizados em aparatos em escala piloto e de demonstração, utilizando lodos de reatores UASB *in natura* (não submetidos à etapa de desaguamento). A caleação mostrou-se 100% eficiente na inviabilização de ovos de *Ascaris* sp. após 30 dias de contato, para as três dosagens testadas. Quanto ao tratamento térmico, foi observada a total inativação de ovos de *A. lumbricoides* para tempos de aquecimento da ordem de 4 a 5 horas e temperaturas máximas próximas a 70°C.

Bastos *et al.* (2007) realizaram experimentos de caleação com o mesmo lodo de reator UASB utilizado no presente estudo sob diferentes condições de mistura lodo / cal (30, 40 e 50% do peso seco de lodo). Com teor de umidade em torno de 70% e aplicação de cal a 50% do peso seco, em 40 dias de estocagem após a caleação foi alcançado o padrão lodo Classe A estabelecido pela legislação brasileira..

### 2.2.3.2 - Secagem em estufa agrícola (solarização)

O termo solarização tem sido empregado em referência a técnicas de controle de fitopatógenos do solo por meio da cobertura da superfície do solo com um filme plástico transparente. Na superfície, a desinfestação do solo se dá, principalmente, pela ação dos raios ultravioletas, enquanto no interior, a ação predominante fica a cargo do aumento e diminuição cíclicos da temperatura (KATAN *et al.*; 1976).

Em tentativa de aplicação dessa técnica para a higienização de lodo no Paraná, Andreoli *et al.* (2000a) relatam eficiência elevada de redução das contagens de ovos de helmintos, mas ponderam que o elevado teor de umidade (pois o plástico colocado diretamente sobre a camada de lodo impede a evaporação da água) dificulta e onera o transporte.

Bueno (2003) aplicou essa técnica em estudos utilizando parcelas de 2,5 x 2,5 m e profundidades 0,05, 0,10 e 0,15 m, e base de massa asfáltica para higienização do lodo produzido na ETE Franca-SP (dois biodigestores anaeróbios em série e desaguamento em filtro – prensa; o biossólido produzido possuía cerca de 20% de matéria sólida). Para o tempo utilizado nos testes (15 dias), os melhores resultados foram obtidos com a profundidade de 0,05 m, sendo alcançada redução de *E. coli* de até 99,99 % e remoção até níveis não detectáveis de ovos de helmintos viáveis.

Uma variante da técnica original de solarização é a cobertura dos leitos de secagem com plástico, inicialmente utilizada com o objetivo de impedir a entrada de águas de chuva. Gonçalves *et al.* (2001b) testaram essa técnica, mas não registraram ganhos de inativação de ovos de helmintos em relação ao já alcançado em leitos sem cobertura.

Outra variante da técnica de solarização que tem sido testada é a secagem em estufa agrícola, com resultados interessantes. Nessa técnica atua o aquecimento do ar interno (efeito estufa), promovendo efeito de

regularização na temperatura do lodo; além do efeito da radiação solar, atua como fator desinfetante a perda de umidade do lodo e, por conseguinte, a dessecação dos organismos. Logo, para a eficácia do sistema, as condições de temperatura local são determinantes.

Nos experimentos de Comparini (2001) de secagem em estufa, o lodo, com elevado teor de umidade inicial (cerca de 80%), à medida que secava era montado no interior da estufa em leiras com altura máxima de aproximadamente 0,50m, revolvidas com pá uma vez por semana. As principais conclusões do trabalho foram: (i) teores de umidade da ordem de 10% foram alcançados em aproximadamente 70 dias; durante o processo, a velocidade de secagem foi baixa até valores no entorno de 70%, verificando-se, a partir daí, redução mais acelerada da umidade até próximo de 20%, quando o decréscimo voltou a se tornar mais lento; (ii) a secagem do biossólido não provocou variações que pudessem ser consideradas importantes no conteúdo de N-total e P-total; (iii) as reduções verificadas na concentração de sólidos voláteis em relação aos totais (de 73% para 53%) não implicam perda de potencial do biossólido como fonte de matéria orgânica tendo em vista as elevadas concentrações de C orgânico obtidas ao final dos períodos de secagem, em média, 322,2 g / kg MS e (iv) a inativação a níveis não detectáveis de salmonela e de bacteriófagos F-específicos foi alcançada com umidade da ordem de 25%; em cerca de 70 dias e com teor de umidade de aproximadamente 10%, as contagens de *E. coli* decaíram a valores abaixo de  $10^3$  NMP/gMS e os ovos viáveis de helmintos para valores próximos a não detectáveis.

No Espírito Santo, Lima *et al.* (2009), utilizaram estufa semelhante à de Comparini (2001) para a secagem / higienização de lodo (digerido e desaguado em centrífuga), disposto em diferentes formas no interior da estufa, com e sem adição de cal. As principais conclusões do trabalho foram: (i) a estufa propiciou temperaturas internas com valores máximos horários acima de 50°C (externa 30,3°C) durante o dia e mínimos horários sempre superiores a 20°C, mesmo estando a temperatura externa, em alguns momentos, abaixo de 16°C; (ii) não houve diferença expressiva na

variação da umidade entre as células com e sem cal; (iii) o revolvimento das leiras três vezes por semana promoveu perda de umidade mais acelerada; (iv) a tentativa de minimizar o espaço ocupado com lodo, espalhando-o com altura de 20 cm, resultou em diminuição muito lenta da umidade quando comparada com as células com altura de 10 cm; (v) nas células com cal o pH manteve-se acima de 12 durante as primeiras 2 horas e acima de 11,5 por mais 22 horas; nas células sem cal o pH inicial de 5,5 se manteve nesse patamar por vários dias, apresentando, em alguns casos, ligeira queda e (vi) a adição de cal promoveu redução mais acentuada na relação SV/ST, em torno de 50%; (vii) o lodo atingiu valores compatíveis com a Classe A da Resolução CONAMA 375/2006 em termos de coliformes, salmonela e ovos de helmintos no 28º dia de experimento, independentemente da adição de cal.

Andreoli *et al.* (2000a) mencionam a necessidade de abertura esporádica da cortina da estufa, pois, caso contrário, a umidade é incorporada novamente à massa de lodo ao fim do dia (pôr do sol). Embora vários autores tenham utilizado estufas de estrutura bem simples, outros utilizaram mecanismos de ventilação e extração automática da atmosfera interna da estufa, como Espericueta e Gonzáles (2008). Esses autores estudaram o efeito da estufa em lodo com concentrações elevadas de *Salmonella* ssp. na cidade de Juarez, México. No início do experimento, o lodo continha 86,22% de umidade e com 11 dias de tratamento atingiu 6,68%, sendo que nesse período a temperatura máxima do lodo foi de 48°C. Ao fim de 18 dias de experimento, se constatou tendência de decaimento exponencial e assintótico para as variáveis umidade e *Salmonella* ssp.. Com remoção de 95% de umidade, a contagem de salmonela caiu de  $1,5 \times 10^{13}$  a  $1,5 \times 10^3$  NMP por grama de sólidos totais

No trabalho de Bonilla e Camperos (2008) a massa de lodo era revolvida diariamente com intuito de conseguir redução homogênea da umidade e promover sua granulação. Os autores relacionaram a umidade com o decaimento de coliformes fecais.

Horn *et al.* (2005) conseguiram excelentes resultados com uso de estufa 'mecanizada'. O teor de sólidos final foi superior a 95% e os sólidos voláteis foram reduzidos a 7,1%, graças à possibilidade de se transmitir até 83% da radiação solar incidente, o que proporcionou taxa de evaporação de até 6,9 kg/m<sup>2</sup>/dia.

Assunção e Henrique (2006) realizaram experimentos com o mesmo lodo de reator UASB utilizado no presente estudo, também no inverno. A estufa foi montada com bambus e lona de 150 micras, em área de 12 m<sup>2</sup> revestida de cimento liso e drenos. O lodo, com umidade de 76% (retirado de leito de secagem 15 dias após o descarte do reator UASB), foi disposto na estufa com temperatura média em seu interior de 35°C. As leiras foram formadas com 10 cm de altura e reviradas semanalmente. Decorridos 40 dias o teor de umidade foi reduzido a 4% e se observou decaimento de *E.coli* de 97,72% (de 6,3 x 10<sup>6</sup> a 1,44. x 10<sup>5</sup> NMP/ g MS) e de 99,07% de ovos de helmintos ( de 108 a 1 ovo/ g MS).

#### **2.2.4. Características dos biossólidos de interesse à aplicação florestal**

A aplicabilidade de lodo de esgotos em sistemas florestais está relacionada às suas características físicas, químicas e biológicas, as quais determinarão, por um lado, o potencial de uso como fertilizante ou condicionador de solo e, por outro, limitações decorrentes da presença de contaminantes químicos e de microrganismos patogênicos. Por sua vez, as características do lodo serão determinadas pela composição do esgoto que lhe dá origem e dos processos de tratamento de esgotos; por exemplo, lodo primário ou secundário, lodo de processo aeróbio ou anaeróbio. Dependerão também dos processos de tratamento do lodo e, como já referido, a grande maioria das normas que regulam o uso de lodo em aplicações agrícola e florestal incluem exigências de produção de biossólidos por meio de processos de estabilização e higienização. Por exemplo, como visto, a caleação pode provocar alterações significativas na

composição do lodo, tais como a elevação do pH, redução na solubilização do fósforo e perdas de nitrogênio por volatilização da amônia.

Na Tabela 2.3 são apresentadas algumas características típicas de lodos de diferentes origens e na Tabela 2.4 de biossólidos utilizados em estudos de aplicação florestal. Em termos gerais, se pode dizer que o lodo ou biossólido apresentam quantidades elevadas de N e menores de P e K, embora isso dependa dos processos de tratamento de esgotos e de lodos. Podem apresentar também quantidades expressivas de micronutrientes, mas não necessariamente nas doses adequadas ou de forma balanceada. No já citado trabalho de Bastos *et al.* (2007), os autores registram que o lodo tratado em estufa apresentou melhores características agrônômicas do que o lodo calcado, sendo que quanto maior a dose de cal, menores os teores de N, P, S e carbono orgânico e, naturalmente, maiores os teores de Ca (Tabela 2.5)

Tabela 2.3 – Teores de sólidos, carbono e nutrientes encontradas em lodos de esgotos gerados em diferentes processos de tratamento (% matéria seca)

Tipo de lodo	ST	C	N	P	K	Ca	Mg
Lodo primário de ETE de lodos ativados	2-6	33	4,5	3,1			
Lodo secundário de ETE de lodos ativados	0,6-1	20-30	2-9	1,5-3,7	0,01-0,36	1,5-7	0,6
Lodo digerido (primário + secundário) de ETE de lodos ativados	3-6	25	3,1	5,6			
Lodo de reator UASB	3-6	20	2,3	0,7-0,9	0,9	0,8	0,3
Lodo de lagoa de estabilização	7-12	27	2-3	0,2-0,6	0,05		

Fonte: adaptado de von Sperling e Gonçalves (2001) e Andreoli *et al.* (2001).

Tabela 2.4 – Características físicas e químicas de biossólidos utilizados em estudos de aplicação florestal (g kg<sup>-1</sup>)

C	N	P	K	Ca	Mg	Na	S	Umidade (%)	pH	Ref
114 <sup>(4)</sup>	26,6 <sup>(4)</sup>	9,5 <sup>(4)</sup>	1,3 <sup>(4)</sup>	95 <sup>(4)</sup>	3 <sup>(4)</sup>	0,5 <sup>(4)</sup>	6 <sup>(4)</sup>	60	10,6	(1)
172,3 <sup>(4)</sup>	18,7 <sup>(4)</sup>	9,4 <sup>(4)</sup>	1,9 <sup>(4)</sup>	86,4 <sup>(4)</sup>	3,8 <sup>(4)</sup>	0,6 <sup>(4)</sup>			10,6	(2)
55,8 <sup>(5)</sup>	30,6 <sup>(4)</sup>	140 <sup>(6)</sup>	2,7 <sup>(7)</sup>	37,6 <sup>(7)</sup>				62,3	5	(3a)
23,4 <sup>(5)</sup>	9,6 <sup>(4)</sup>	63 <sup>(6)</sup>	0,08 <sup>(7)</sup>	0,5 <sup>(7)</sup>				46,7	8	(3b)
Fe	Zn	Mn	Cd	Pb	Cr	Ni	Cu			
39200	1500	300	21	200						(1)
55056	1632		Traços		268	222	900			(2)
40 <sup>(8)</sup>	376 <sup>(8)</sup>	124 <sup>(8)</sup>					2,20 <sup>(8)</sup>			(3a)
	0,04 <sup>(8)</sup>	0,4 <sup>(8)</sup>					0,80 <sup>(8)</sup>			(3b)

(1) Vaz e Gonçalves (2002). ETE Barueri - SP. Lodo de digestão aeróbica (fase de decantação) e anaeróbica (fase final no digestor). Biossólido produzido por adensamento e higienização com cloreto férrico (100 kg de FeCl<sub>3</sub> t<sup>-1</sup> de biossólido) e cal extinta (250 kg de cal extinta t<sup>-1</sup> de biossólido). (2) Guedes *et al.* (2006). ETE Barueri - SP. Lodo e biossólidos produzidos como em (1) (3) Bonnet *et al.* (2002), Paraná, lodo de reator UASB. (a) biossólidos produzidos por co-compostagem com resíduos vegetais; (b) biossólidos produzidos por caleação e estocagem por 24 meses. (4) (g kg<sup>-1</sup>), (5) g dm<sup>-3</sup>, (6) mg dm<sup>-3</sup>, (7) cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, (8) mg kg<sup>-1</sup>

Tabela 2.5 - Caracterização agrônômica de lodo tratado por caleação e secagem em estufa

Lodo	N	P	K	Ca	Mg	S	CO	C/N
%-----								
Lodo Cal 30%	1,54	0,59	1,2	9,11	0,23	1,43	7,02	4,55
Lodo Cal 40%	1,96	0,56	0,06	10,93	0,19	1,34	7,02	3,58
Lodo Cal 50%	1,26	0,39	0,12	24,4	0,34	0,89	5,25	4,22
Estufa agrícola	3,33	0,91	0,18	1,84	0,19	1,53	9,98	2,99

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

O uso do biossólido não visa, ou não garante, a substituição por completo da adubação mineral, mas constitui alternativa viável de adubação complementar e, ou de condicionamento do solo. E, nesse sentido, os apelos de ordem ambiental e mesmo econômica são nítidos pois, de acordo com dados de 2009, no Brasil, a elevação dos preços médios dos fertilizantes em relação a 2007 foi de 98,6% (MAGNO, 2009); e o consumo aumentou em mais de 800% nas últimas quatro décadas: em 1998 foram consumidos 7,4 milhões de toneladas e em 2008 mais de 22 milhões de toneladas (ANDA, 2002; ANDA, 2009). Em 2002 o Brasil já ocupava a quarta colocação no mercado mundial, liderado pela China, EUA e Índia (NEVES *et al.*, 2002). Conforme Lopes e Bastos (2007), entre

1994 e 2004 o Brasil apresentou déficit anual de cerca de 0,9 milhões de toneladas de N e 0,4 milhões de P e K; por outro lado, aproximadamente 197 mil toneladas de fósforo, 737 mil toneladas de nitrogênio e mais de 4 milhões de toneladas de carbono são despejados em cursos de água por falta de tratamento de esgotos no país (TUNDISI, 2005).

No que diz respeito à presença de contaminantes químicos e microbiológicos, em se tratando de lodos de esgotos domésticos, os primeiros podem não constituir problema maior, mas a presença de organismos patogênicos sim. Na Tabela 2.6 são apresentadas informações de literatura compiladas por Bastos *et al.* (2009) sobre concentrações típicas de *E.coli* e de organismos patogênicos encontrados em lodos de esgotos e biossólidos. Foram selecionadas informações de lodos tratados por digestão mesofílica e por caleação, tomados como exemplos, respectivamente, de lodos Classe A e B.

Tabela 2.6 – Características microbiológicas (organismos patogênicos e indicadores de contaminação) típicas de biossólidos e de lodos de esgotos sanitários.

Microrganismo	Lodo <sup>(1)</sup>	Biossólidos	
		Digerido <sup>(2)</sup>	Caleado
Coliformes termotolerantes <sup>(3)</sup>	10 <sup>7</sup> - 10 <sup>8</sup>	10 <sup>5</sup> - 10 <sup>7</sup>	10 <sup>2</sup>
<i>Escherichia coli</i> <sup>(3)</sup>	10 <sup>5</sup> - 10 <sup>7</sup>	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>6</sup>	1 - 10 <sup>2</sup>
<i>Salmonella</i> spp. <sup>(3)</sup>	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>4</sup>	1 - 10	ND-0,1
Vírus entéricos <sup>(4)</sup>	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>3</sup>	1 - 10	0,1 - 1
Rotavírus <sup>(4)</sup>	10 - 10 <sup>3</sup>	-	-
Ovos de helmintos <sup>(5)</sup>	10 - 10 <sup>2</sup>	0,3 - 13	ND - 2
<i>Giardia</i> spp. <sup>(6)</sup>	10 <sup>2</sup>	0,5	-
<i>Cryptosporidium</i> spp. <sup>(6)</sup>	10 - 10 <sup>3</sup>	1 - 10	0,1 - 1

(1) Lodos primário, secundário ou de reator UASB, sem tratamento; (2) digestão aeróbia ou anaeróbia mesofílica; (3) NMP / g ST; (4) Unidade formadora de placa (UFP) / g ST; (5) ovos / g MS; (6) (oo)cistos / g ST. ND: não detectável.

Fonte: adaptado de Bastos *et al.* (2009)

### 2.2.5. Regulamentação sobre o uso de biossólidos

A Resolução CONAMA nº 375 de 29 de agosto de 2006, que define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados

(BRASIL, 2006), estabelece duas classes de lodo com as exigências de qualidade microbiológica expressas na Tabela 2.7.

Como citado no item 2.2.3, com referência explícita na regulamentação dos Estados Unidos (USEPA, 1994), a Resolução CONAMA N°375/2006 lista processos para redução significativa de patógenos (necessários para a obtenção de lodo Classe B), redução adicional de patógenos (necessários para a obtenção de lodos Classe A) e para redução da atratividade de vetores.

Tabela 2.7 – Qualidade microbiológica das classes de lodo estabelecidas na Resolução CONAMA 375 / 2006.

Classe de lodo	Concentração
A	Coliformes termotolerantes < $10^3$ NMP / g ST
	Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo / g ST
	<i>Salmonella</i> : ausência em 10 g ST
	Vírus <sup>(1)</sup> < 0,25 UFP ou UFF / g ST
B	Coliformes termotolerantes < $10^6$ NMP / g de ST
	Ovos viáveis de helmintos < 10 ovos / g de ST

NMP: Número Mais Provável; ST: Sólidos Totais; UFP: Unidade Formadora de Placa; UFF: Unidade Formadora de Foco. (1): O termo “vírus entérico” compreende todos os grupos de vírus que estão presentes no trato gastrointestinal humano e que, após transmissão por via fecal-oral, podem causar infecções ou enfermidades em indivíduos.

Adicionalmente, a regulamentação brasileira determina:

- (i) a proibição da utilização de qualquer classe de lodo 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, a menos que sejam decorridos 24 e 48 meses desde última aplicação, respectivamente, nos casos de pastagens e dos demais cultivos;
- (ii) a restrição à utilização de lodo classe B ao cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, com a aplicação mecanizada, em sulcos ou covas, seguida de incorporação;

- (iii) em caso de colheita manual, a aplicação de lodo classe B deverá ser feita no mínimo 6 meses antes da colheita;
- (iv) o acesso ao público às áreas de aplicação de lodo classe B deverá ser restringido durante período de 12 meses após a última aplicação.

Na Tabela 2.8 encontram-se os padrões microbiológicos para lodos Classe A e B estabelecidos pela norma dos Estados Unidos, conhecida como *Part 503 Rule* (USEPA, 1994) e doravante aqui denominada ‘Norma 503’

Tabela 2.8 – Qualidade microbiológica das classes de lodo estabelecidas na Norma 503 dos Estados Unidos.

Classe de lodo	Concentração
A	Coliformes termotolerantes < 10 <sup>3</sup> NMP / g ST, ou <i>Salmonella</i> < 3 NMP / 4g ST, e Ovos de helmintos < 1 / 4g ST, e Vírus < 1 UFP / 4g ST, ou avaliação da eficiência do tratamento por meio de parâmetros operacionais definidos para cada ‘processo de redução adicional de patógenos’
B	Coliformes termotolerantes < 2 x 10 <sup>6</sup> NMP / g de ST, ou avaliação da eficiência do tratamento por meio de parâmetros operacionais definidos para cada ‘processo de redução significativa de patógenos’.

NMP: Número Mais Provável; ST: Sólidos Totais; UFP: Unidade Formadora de Placa.

De acordo com a Norma 503, caso atinja também requisitos de redução de metais e vetores, o lodo Classe A pode ser utilizado sem quaisquer restrições, incluindo a possibilidade de comercialização ou distribuição e a aplicação em gramados e jardins residenciais. Essas últimas opções de uso não são permitidas para biossólidos Classe B, os quais, no entanto, podem ser aplicados em grande escala em solos agrícolas e florestais, em recuperação de áreas degradadas e em locais públicos, desde que os requisitos de controle de vetores e contaminantes

químicos sejam observados, bem como as restrições de uso resumidas a seguir.

- (i) Intervalos entre a aplicação de biossólidos e a colheita: (a) 14 meses para culturas cuja parte comestível cresce em contato com o solo; (b) 20 meses para culturas cuja parte comestível cresce sob o nível do solo quando o biossólido for incorporado ao solo pelo menos 4 meses antes e 38 meses se o biossólido for incorporado ao solo menos de 4 meses antes; (c) 30 dias para outros tipos de culturas comestíveis, forrageiras e fibras;
- (ii) Intervalo entre a aplicação de biossólidos e a permissão para pastagem de animais: 30 dias.
- (iii) Intervalos entre a aplicação de biossólidos e a permissão de acesso de público: (a) 12 meses no caso de exposição intensa; (b) 30 dias no caso de exposição limitada.

Na leitura de Bastos (2010), em geral, a regulamentação brasileira parece ser uma adaptação mais rigorosa da Norma 503.

A Resolução CONAMA 375/2006 e a Norma 503 têm como fundamento a abordagem da dupla barreira de proteção: a definição de critérios de qualidade microbiológica para duas classes de lodo e a imposição de restrições de uso. Pressupõe-se que as exigências para os lodos Classe A e B alcancem o mesmo nível de redução de risco / proteção à saúde. No caso da Classe A, pelo tratamento do lodo em si, reduzindo os patógenos a níveis abaixo dos limites de detecção. Para a Classe B, a redução de risco ou proteção à saúde seria alcançada por processos de tratamento que reduziriam os patógenos a níveis ainda detectáveis e por restrições de cultivo e de acesso (humano e animal). Impõem-se, assim, intervalos de tempo entre a aplicação do biossólido e o momento da exposição, quando o decaimento natural proporcionaria redução adicional de patógenos até concentrações abaixo dos limites de detecção (portanto, a níveis de proteção equivalentes àqueles alcançados por biossólidos Classe A) (NRC, 2002; USEPA, 2003).

Nessa lógica, a Norma 503 não estabelece restrições de uso para lodo Classe A, mas a Resolução CONAMA 357/2006, na visão de Bastos (2010) de forma contraditória, impõe exigências extremamente conservadoras. Além disso, os padrões de qualidade Classe A e B são praticamente idênticos na regulamentação dos dois países, mas enquanto a Norma 503 põe em prática conceitos de parâmetros indicadores (no caso, coliformes termotolerantes como indicadores de *Salmonella* e parâmetros de controle operacional de processos de tratamento como indicadores da remoção de vírus e ovos de helmintos), a Resolução CONAMA 357/2006 os ignora (BASTOS, 2010).

Para lodo classe B a legislação brasileira é mais flexível em termos de qualidade microbiológica requerida (padrão de ovos de helmintos), porém, novamente, mais restritiva em relação às possibilidades de uso. As restrições à utilização de biossólidos Classe B estabelecidas na Norma 503 foram desenvolvidas levando em consideração a sobrevivência dos patógenos no solo, tendo como referência os ovos de helmintos, os quais são reconhecidos como os organismos mais resistentes (USEPA, 2003). Como destacado por Bastos (2010), em princípio, as condições climáticas brasileiras deveriam ser menos favoráveis para a sobrevivência de patógenos, mas, ainda assim, a Resolução CONAMA 375/2006 estabelece critérios muito mais restritivos.

Nesse sentido, cabe registrar os resultados do trabalho de Argel (2010), que avaliou o decaimento de *E.coli* e de ovos de helmintos em misturas de solo e lodo de esgoto higienizado por secagem em estufa e por caleação (lodo de mesma origem do utilizado no presente trabalho). Em experimentos de bancada foram realizadas misturas de 75, 50 e 25% de biossólido com solo, além de um tratamento sem biossólido, ou seja, 100% de solo. As amostras de biossólido utilizadas foram caracterizadas como Classe B, segundo a Resolução CONAMA nº 375/2006. As concentrações iniciais de *E. coli* e de ovos de helmintos nas misturas solo + lodo tratado em estufa foram:  $7,86 \times 10^1$  *E. coli* /g ST e ovos de helmintos não detectáveis (100% solo);  $3,45 \times 10^2$  *E. coli* /g ST e 0,89 ovos /g ST (25%

biossólidos);  $2,10 \times 10^3$  *E. coli* /g ST e 1,18 ovos /g ST (50% biossólidos);  $3,49 \times 10^3$  *E. coli* /g ST e 1,38 ovos /g ST (75% biossólidos). Nos tratamentos com lodo caledo a *E.coli* esteve sempre ausente e as concentrações de iniciais de ovos de helmintos foram: não detectáveis (100% solo); 0,73 ovos /g ST (25% biossólidos); 0,80 ovos /g ST (50% biossólidos) e 0,91 ovos /g ST (75% biossólidos). Nos tratamentos com lodo de estufa foi observado crescimento de *E.coli* nas misturas solo + biossólido entre os dias 15 e 30 de monitoramento, mas aos 90 dias esses organismos não foram mais detectados; nesses mesmos tratamentos e ao final do experimento (90 dias) as cocentrações residuais de ovos de helmintos estiveram entre de 0,48 e 0,12 ovos por g ST, respectivamente nos tratamentos com 75 e 25% de biossólidos. Nos tratamentos com lodo caledo ao final de 90 dias foram encontrados 0,07 ovos de helmintos por grama de ST nas três misturas solo + biossólidos.

A Resolução CONAMA 375 / 2006 estabelece ainda que “decorridos cinco anos após sua publicação, somente será permitida a aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado classe A, exceto sejam propostos novos critérios ou limites baseados em estudos de avaliação de risco e dados epidemiológicos nacionais, que demonstrem a segurança do uso do lodo de esgoto Classe B.”

Bastos *et al.* (2009), recorrendo a modelos de Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico (AQRM), criticam a perspectiva de banimento do uso do lodo Classe B como medida desnecessariamente rigorosa, mas em contrapartida apontam que essa indicação da Resolução CONAMA nº 375/2006 abre uma importante pauta de pesquisas, que bem poderia ser estendida à legislação como um todo, ou seja, aos padrões de qualidade microbiológica e possibilidades de uso das duas classes de lodo (A e B) em diferentes cenários de exposição. Nesse mesmo trabalho, os autores sugerem que a atual versão da legislação brasileira possa ser demasiadamente rigorosa para o padrão Classe A, tanto nos critérios de qualidade do lodo, quanto, principalmente, nas restrições de uso. Sugerem também que riscos mais elevados parecem estar relacionados mais à

saúde ocupacional (risco do trabalhador) do que à saúde do consumidor e que o padrão Classe B, por sua vez, seja por demais permissivo, principalmente o padrão de helmintos.

### **2.3. Objetivos**

Produzir biossólidos Classes A e B por dois processos de higienização (caleação e secagem em estufa agrícola) e caracterizá-los por meio de parâmetros microbiológicos e de interesse para uso florestal.

### **2.4. Material e métodos**

#### **2.4.1. Produção de biossólidos**

Os experimentos foram desenvolvidos na Unidade Integrada de Tratamento e Utilização de Esgotos Sanitários da Violeira, localizada no bairro de mesmo nome no município de Viçosa – MG.

O município de Viçosa, com área de 300 Km<sup>2</sup> e população de 72.244 habitantes, está situado na região da Zona da Mata-MG; encontra-se a uma altitude de 649 m e tem como coordenadas geográficas o paralelo de 20°45'14", latitude S, e o meridiano de 42°52'54", longitude W Gr. O clima da região é, segundo a classificação de Köppen, do tipo Cwb - clima tropical de altitude com verão chuvoso e temperaturas amenas; a precipitação anual é de 1.121 mm e a temperatura média anual 19,4°C, com os meses mais quentes apresentando temperatura média de 22,3°C e o mês mais frio média de 15,4°C. A precipitação é concentrada entre os meses de novembro a março (BOARETT *et al.*, 1998; PMV, 2011).

O lodo utilizado para a produção de biossólidos foi proveniente do descarte do reator UASB da ETE Violeira em leito de secagem coberto com lona plástica translúcida com 3 m de altura (Figuras 2.2 e 2.3). O reator UASB é seguido de um biofiltro submerso aerado, o qual, entretanto,

não foi incluído no escopo do trabalho. O reator UASB recebe os esgotos sanitários de parte da comunidade do bairro Violeira e apresenta as seguintes características (ASSUNÇÃO e HENRIQUE, 2006; SAAE, 2011): (i) população de projeto de 1.500 habitantes, recebendo atualmente a contribuição de cerca de 800 habitantes, com vazão média de 115 m<sup>3</sup>/dia; (ii) área superficial de 8,4 m<sup>2</sup> (2,40 m x 3,50 m), 5,70 m de altura e volume de 48 m<sup>3</sup>.

O lodo era descartado do reator UASB no leito de secagem, composto por duas células (Figura 2.4), e daí retirado e encaminhado para higienização.



Figura 2.2 - Reator UASB (a), leito de secagem coberto (b) e biofiltro submerso aerado (c), ETE Violeira, Viçosa-MG.



Figura 2.3 - Cobertura do leito de secagem, ETE Violeira, Viçosa-MG.



Figura 2.4 - Lodo no leito de secagem recém descartado (a) e após cerca de 15 dias (b), ETE Violeira, Viçosa-MG

Cada evento de descarte do lodo do reator UASB deu origem a um 'lote' de lodo, os quais foram monitorados durante a secagem no leito e ao longo dos processos de higienização empregados (caleação e secagem em estufa) para a produção de biossólidos Classes A e B. Os descartes foram efetuados em intervalos de cerca de 20 dias. Ao todo foram acompanhados três lotes de lodo ao longo dos seguintes períodos: (i) Lote 1, de 05/06/2009 a 27/10/2009; (ii) Lote 2, de 25/06/2009 a 27/10/2009; (iii) Lote 3, de 14/07/2009 a 27/10/2009.

Em relação ao cronograma descrito, cabe esclarecer que embora as classes de lodo desejadas tenham sido obtidas até o dia 16/09/2010, o material remanescente permaneceu em processo de higienização, tendo sido realizada uma análise final no dia 27/10/2009 nos três lotes, apenas para efeito de monitorar o comportamento das variáveis aqui mensuradas. Cabe também registrar que somente o Lote 1 foi utilizado nos experimentos com mudas de eucalipto (ver capítulo 3)

Cada lote no leito de secagem era dividido igualmente em duas partes (metade de uma célula - 2,0 x 2,05 m), sendo cada uma dessas partes encaminhada para cada um dos processos de higienização. A parte encaminhada para a caleação era retirada do leito ao atingir cerca de 70% de teor de umidade, sendo essa condição alcançada aproximadamente seis dias após o descarte. A outra parte, destinada à secagem em estufa permanecia no leito por até 15 dias, não havendo nesse caso, necessariamente, condição específica de umidade a ser observada (Figura 2.5).



Figura 2.5 - Lodo remanescente (a ser enviado para estufa) sete dias após o descarte e após retirada de metade do lote para caleação.

#### **2.4.1.1. Caleação**

A caleação foi realizada com a adição de cal virgem ( $\text{CaO}$ ) na proporção de 50% em relação ao peso seco do lodo, que se encontrava com teor de umidade próxima a 70%.

A mistura da cal com o lodo era realizada nas dependências do SAAE Viçosa com o emprego de betoneira (Figura 2.6). Após a mistura, o lodo era mantido em leira na 'casa de lodo caleado' na unidade experimental da Violeira (Figura 2.7). A leira permanecia coberta com lona plástica preta (visando reter os gases liberados, principalmente amônia) pelo tempo necessário para alcançar a condição de biossólido Classe A ou B (Figura 2.7).



Figura 2.6 - Mistura do lodo com a cal em betoneira (esquerda) e lodo caleado logo após mistura (direita)



Figura 2.7 - Casa lodo caleado (esquerda) e lona de cobertura das leiras (direita)

A massa de cal adicionada ao lodo foi determinada com base no teor de umidade do lodo pré-desidratado, de acordo com o procedimento descrito por Andreoli *et al.* (1999). Foi utilizada cal virgem (CaO) da empresa Cal Oeste Ltda, disponibilizada em sacos de 20 Kg.

A casa de lodo caleado (Figura 2.7) apresentava dimensões de 4 x 3 m (12 m<sup>2</sup>), com piso levemente inclinado e com drenos em sua extremidade. Foram construídas muretas de 10 cm de alvenaria no entorno para evitar entrada de água (por escoamento superficial); a cobertura era de lona plástica translúcida de 150 micra com abertura nas laterais para circulação do ar.

#### 2.4.1.2. Secagem em estufa

A estufa possuía dimensões de 9 x 6 m, em forma de arco com altura máxima de 5 m ao centro e altura das paredes laterais de 3,0 m. A cortina frontal era ajustável para abertura por meio de manivela, sendo que no restante do perímetro a cortina era fixa junto à parede de alvenaria com altura de 50 cm. O piso foi construído em concreto com leve declínio em direção a porta (cortina frontal) (Figura 2.8). O processo de secagem foi realizado sob condições atmosféricas naturais, e nenhum parâmetro climático foi controlado de forma sistemática durante o tempo de experimentação.



Figura 2.8 - Estufa para secagem do lodo. Vista geral (esquerda) e detalhe da cortina frontal aberta e do lodo no interior da estufa (direita).

Segundo os procedimentos adotados por Comparini (2001) e Lima *et al.*(2009), o lodo era disposto no interior da estufa em leiras de altura de aproximadamente 20 cm e submetido a revolvimento manual com frequência semanal (Figura 2.9). O lodo permanecia na estufa até alcançar condição de Classe A ou B.



Figura 2.9 - Revolvimento do lodo na estufa

#### **2.4.1.3. Preparos adicionais do biossólido para o plantio de mudas de eucalipto em tubetes**

Quando a condição de biossólido Classe B nos dois processos de higienização foi alcançada o lodo ainda apresentava teor de umidade em torno de 70%, gerava fortes odores e dificultava o transporte e manuseio. Para uso do biossólido no plantio das mudas de eucalipto (Capítulo 3), foi necessário reduzir o teor de umidade até cerca de 50%. Todavia, quando atingiu esse valor, em ambos processos processos de higienização, o biossólido se apresentava na forma de torrões, o que inviabilizava seu uso nos tubetes para o plantio das mudas. Assim, no intuito de reduzir a granulometria do biossólido foi utilizado um moinho no Laboratório de Matéria Orgânica, Departamento de Solos da UFV. Porém, com o teor de umidade em torno de 50% não foi possível moer, já que o biossólido prendia-se nas fendas do moinho. De forma a contornar todos esses obstáculos, os seguintes procedimentos foram então adotados.

O biossólido foi colocado sobre lona plástica em área coberta e sombreada por 48 horas (Figura 2.10), para então ser quebrado em partes menores com uso de um 'socador' e vir a perder umidade até patamares inferiores a 20%, para então ser moído. A peneira do moinho foi retirada, pois apenas o movimento das "facas" se mostrou suficiente para reduzir a granulometria para o patamar desejável. A passagem do lodo pelo moedor (Figura 2.11) promoveu a redução da granulometria do lodo para

aproximadamente 5 mm e nessa condição o biossólido moído foi utilizado para o preenchimento dos tubetes a serem utilizados no plantio de mudas de eucalipto. O período compreendido entre a obtenção da classe de lodo (A ou B), preparação para moagem e distribuição do lodo nos tubetes para compor os diferentes tratamentos de plantio foi de aproximadamente cinco dias.

De forma similar, Nóbrega *et al.* (2007) levaram o biossólido a secagem ao ar livre e sobre lona plástica, onde posteriormente foi triturado, de forma a reduzir o tamanho dos grânulos em peneira de 4 mm, e assim efetuar o plantio de mudas de aroeira. Souza Júnior *et al.* (2008) peneiraram o substrato Plantmax com o objetivo de eliminar partículas grosseiras (maiores que 5 mm).



Figura 2.10 – Lodo disposto sobre lona plástica para secagem adicional e quebra prévias à moagem.



Figura 2.11 – Moinho utilizado para reduzir a granulometria do lodo

#### 2.4.2. Parâmetros de controle

O Quadro 2.1 relaciona os parâmetros avaliados, a periodicidade de coleta de amostras e o método adotado na análise do lodo em processo de higienização. No leito de secagem, os parâmetros mencionados foram monitorados em amostra única tomada logo após o descarte do reator UASB. As análises físicas, químicas e microbiológicas foram realizadas no Laboratório de Divisão de Água e Esgoto da Universidade Federal de

Viçosa. A forma de coleta (uso de sacos estéreis, homogeneização de amostras, cuidados essenciais de assepsia e outros) seguiram preceitos estabelecidos por Andreoli *et al.* (1999), Andreoli e Bonnet (2000) e Environment Agency (2003a).

Quadro 2.1: Parâmetros de controle, tipo e periodicidade de coleta das amostras e métodos empregados no acompanhamento do lodo

<b>Parâmetro</b>	<b>Periodicidade</b>	<b>Método</b>
Umidade	Semanal	Andreoli e Bonnet (2000)
Sólidos totais	Semanal	<i>Standard Methods</i> – método 2540G (APHA, 1998)
pH	Semanal	Método EPA 9045 D (USEPA, 2004)
Coliformes totais e <i>E.coli</i>	Semanal	Environment Agency (2003b)
<i>Salmonella ssp.</i>	Semanal	Environment Agency (2004)
Ovos viáveis de Helminthos	Semanal	Meyer <i>et al.</i> (1978), adaptado por Zerbini e Chernicharo (2001) e Godinho (2001)
Temperatura do ar acima do leito de secagem, na casa de lodo caleado e na estufa agrícola	Aleatória	Termômetro analógico

De forma sucinta, os métodos são assim descritos:

- A umidade é obtida com manutenção de amostra de 200 g de lodo em estufa por 24 h a 65°C.
- A determinação de sólidos totais se dá por meio da secagem de uma amostra de 50g em estufa à 103-105°C por 1 hora, procedimento este repetido até que a diferença de peso em relação à medição anterior não seja maior que 4%.
- O pH é determinado a partir da homogeneização de 20 g de lodo e 50 mL de água destilada em béquer de 100 mL, seguida de agitação, repouso e medição com eletrodo.
- A análise de *E. coli* foi realizada com o método do substrato enzimático e uso do meio Colilert®.
- A análise de *Salmonella* foi realizada de acordo com o seguinte protocolo: pré-enriquecimento de amostra de 10 g (base seca) suspensa em 90 mL

de água peptonada tamponada; enriquecimento em Rappaport Vassiliadis, plaqueamento em e Agar Xilose Lisina Desoxilcolato – XLD, confirmação bioquímica de colônias típicas em Agar Triplice Açúcar Ferro (TSI) e, por fim, soroconfirmação.

- A pesquisa de helmintos foi realizada a partir de amostras de 75g de lodo com emprego da técnica de centrifugação -flotação com sulfato de zinco, seguida de filtração em membrana, raspagem da membrana para placa de Petri contendo solução de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, transferência de alíquota para câmara de Sedgwick-Rafter e leitura ao microscópio. Considerou-se ovo viável aquele que após o período de 28 dias de incubação apresentou em seu interior uma larva formada e ovo não viável aquele que permaneceu em qualquer outro estágio anterior, mas não se diferenciou em larva (GODINHO, 2001).

- A temperatura medida por meio de termômetro posicionado a 2 m do solo, na posição vertical, com confirmação de leitura após 3 minutos.

## **2.5. Resultados e discussão**

A seguir são apresentados os resultados de cada parâmetro acompanhado em cada um dos três lotes de lodo, em cada processo de higienização.

### **2.5.1. Temperatura**

De forma a subsidiar as discussões sobre os processos de higienização, a temperatura foi medida, aleatoriamente, nos seguintes pontos: temperatura ambiente externa, em baixo da cobertura do leito de secagem, na casa de lodo caleado e na estufa de secagem de lodo (Tabela 2.9).

Tabela 2.9 – Dados de temperatura (°C) durante os experimentos de higienização do lodo.

Data	Horário	Temperatura externa do ar	Leito de secagem	Casas de lodo caleado	Estufa
17/06/2009	09 h	18	18	21	22
24/06/2009	09 h	23	25	27	29
29/06/2009	14 h	27	25	35	38
22/07/2009	10 h	22	22	25	29
30/07/2009	14 h	31	29	36	41
05/08/2009	09 h	19	19	19,5	21
06/08/2009	15 h	28	26,5	33	40
02/09/2009	09 h	27	29	33	40
03/09/2009	15 h	31	32	37	42

Os experimentos foram conduzidos entre junho e setembro de 2009, com tendência de elevação da temperatura mais ao final desse período. De maneira geral se percebe que a estufa de secagem de lodo promoveu elevação da temperatura. Quando a temperatura externa era mais baixa, no entorno de 20°C, os incrementos foram da ordem de 2-7°C, mas nos dias mais quentes foram registradas elevações de temperatura do interior de estufa bem mais elevados, de até 13°C. Esses dados ratificam o entendimento de que o emprego desse processo de higienização deve levar em consideração as características climáticas do local a ser implantado e que, no presente estudo as condições se mostraram favoráveis, mesmo no inverno. A título de comparação, Lima *et al.* (2009), em experimentos realizados em Vitória – ES de fevereiro a abril de 2007 usando estufas para secagem de lodo caleado e sem cal, registraram temperatura interna máxima de 50°C quando a externa era de 30,3°C; em períodos de temperatura externa abaixo de 16°C a temperatura interna da estufa não foi superior à 20°C.

Também de maneira geral, se percebe que a cobertura do leito de secagem por vezes não promoveu incrementos de temperatura e quando promoveu estes não foram superiores à 2°C. No que diz respeito à casa de lodo caleado, embora fosse coberta com plástico translúcido, as aberturas laterais podem ter favorecido permitiram a dissipação do calor, mas ainda assim houve incrementos de temperatura em relação ao ambiente externo, de até 6°C (02/09/2009).

Vale ressaltar que a temperatura registrada na casa de lodo caleado e na estufa podem não ser as mesmas da massa de lodo, pois não ocorre incorporação direta de calor (ANDREOLI *et al.*, 2000b).

### **2.5.2. Umidade**

Teores de umidade de 70% ou menos foram alcançados com seis dias de permanência do lodo no leito. Vale destacar que a altura da torta era de aproximadamente 10 cm e que isso deve ter contribuído para a perda rápida de umidade. No trabalho de Assunção e Henrique (2006) também na ETE Violeira, foram necessários 15 dias para atingir umidade de 76% do lodo no leito, também na estação do inverno, mas à época do trabalho desses autores ainda não havia cobertura no leito de secagem.

Andreoli (2001) afirma que o leito de secagem sem nenhuma outra forma de acúmulo de calor já se configura um bom mecanismo de desinfecção e inviabilização de ovos de helmintos. Campos (1999) indica que o lodo atinge 60 a 70% de umidade entre 20 a 40 dias em leitos de secagem e menciona experiências na ETE da Penha, RJ, onde atingiu 50% em 20 dias. Rocha *et al.* (2009) retiravam o lodo do leito entre 20 e 40 dias após descarte, variação esta decorrente das condições climáticas, mas relatam que a chuva não interferiu na umidade do lodo.

Nas figuras a seguir são apresentadas informações de queda dos teores de umidade do lodo durante os experimentos de higienização.

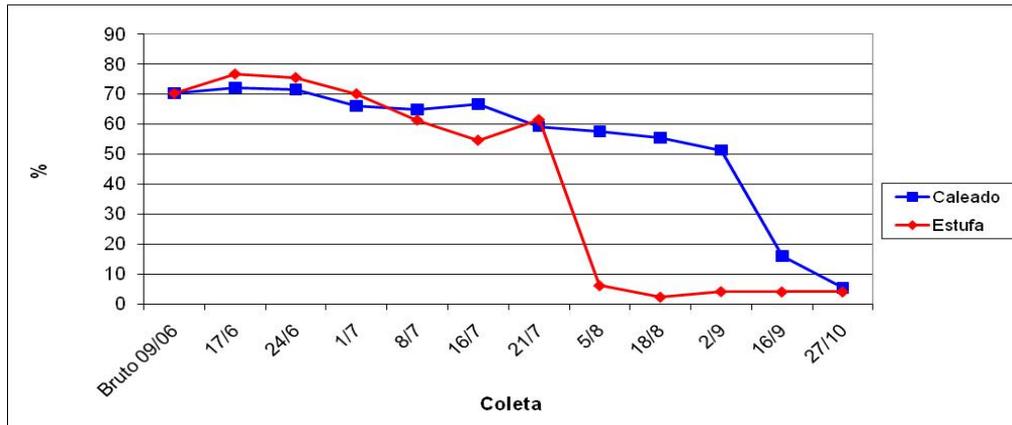


Figura 2.12 – Teor de umidade (%) do lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 1.

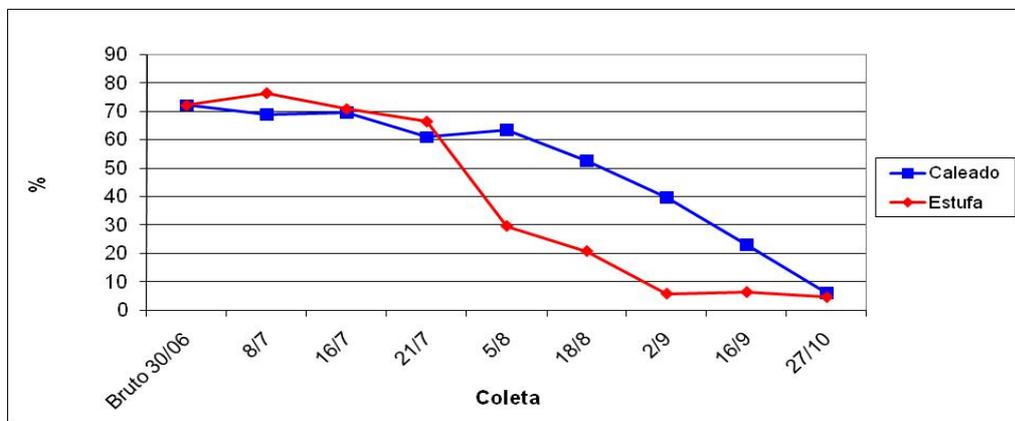


Figura 2.13 – Teor de umidade (%) do lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 2.

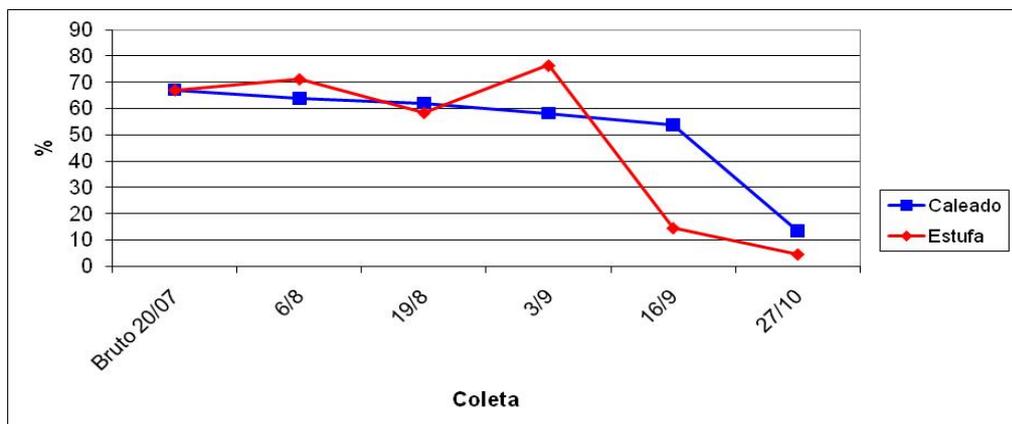


Figura 2.14 – Teor de umidade (%) do lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 3.

Em relação ao tratamento em estufa, o lodo saía do leito de secagem após aproximadamente 15 dias, com umidade próxima a 70%. A queda de umidade do lodo em estufa foi mais acentuada quando comparado ao lodo caleado armazenado na casa de lodo caleado. De qualquer forma, a interferência da temperatura externa (ambiental) exerce efeito direto sobre a perda de umidade em ambos os processos de higienização.

Nos três lotes do tratamento em estufa foi observada queda inicial lenta do teor de umidade seguida de queda brusca, a partir de quando a umidade atingia cerca de 60% decaindo rapidamente até valores próximos ou abaixo de 10% (figuras 2.12, 2.13 e 2.14). Comportamento similar foi observado para o lodo caleado, porém mais atenuado; no entanto, os teores de umidade foram também inferiores a 10% ao final das análises (75 a 120 dias). Ainda sobre o lodo caleado, até o momento da retirada da lona, ocorre leve fluxo de água na leira; quando se retira a lona, a leira apresenta trincas e forma torrões decorrente da queda de umidade. De acordo com as recomendações de Andreoli *et al.* (1999), o lodo caleado deve permanecer coberto com lona plástica preta por cerca de 15 dias, de forma a reter amônia e reduzir as perdas de N.

Lima *et al.* (2007) também verificaram demora em atingir 70% de umidade em tratamento de lodo em estufa, seguida de queda de 70 para 20% em apenas 21 dias e, na sequência, nova queda mais lenta. Essa queda de umidade mais lenta em valores mais baixos de umidade também foi observada nos presentes experimentos, exceto no Lote 1. Comportamento similar foi também observado nos experimentos em estufa de Comparini (2001), verificando-se dificuldade maior do lodo em perder umidade entre os valores iniciais, acima de 80%, e um valor no entorno de 70%; a partir daí verificou-se redução mais acelerada até valores próximos de 20%. O valor mínimo de umidade obtido foi de cerca de 10%, atingido em aproximadamente 70 dias.

As quedas mais lentas nas fases iniciais dos experimentos podem ter sido influenciadas pelas temperaturas mais baixas de inverno e, como a cortina da estufa permaneceu sempre fechada, eventualmente eram observadas gotículas de água escorrendo pelas paredes internas do filme de plástico. Em contrapartida, as quedas de umidade bruscas podem ter sido motivadas por elevações da temperatura no mês de setembro. Acredita-se também que o revolvimento tenha contribuído para as quedas dos teores de umidade, muito embora essa variável não tenha sido isolada para avaliação. Lima *et al.* (2009) relatam que o revolvimento das leiras três vezes por semana promoveu perda de umidade mais acelerada. Andreoli *et al.* (2000a) cita que em seu experimento a umidade permaneceu em 76% após 28 dias de experimento e relata dificuldades em avaliar se o revolvimento acelera o incremento de sólidos, embora este autor tenha realizado o revolvimento em leito sem cobertura e com influência direta da precipitação.

### **2.5.3. Sólidos totais**

Naturalmente, a evolução do teor de sólidos totais no lodo durante os processos de higienização seguiu tendência crescente, inversa à da umidade. Nos dois processos de higienização foi observada tendência à estabilização a partir do momento em que o teor de sólidos atingiu cerca de 95% (figuras 2.15, 2.16 e 2.17).

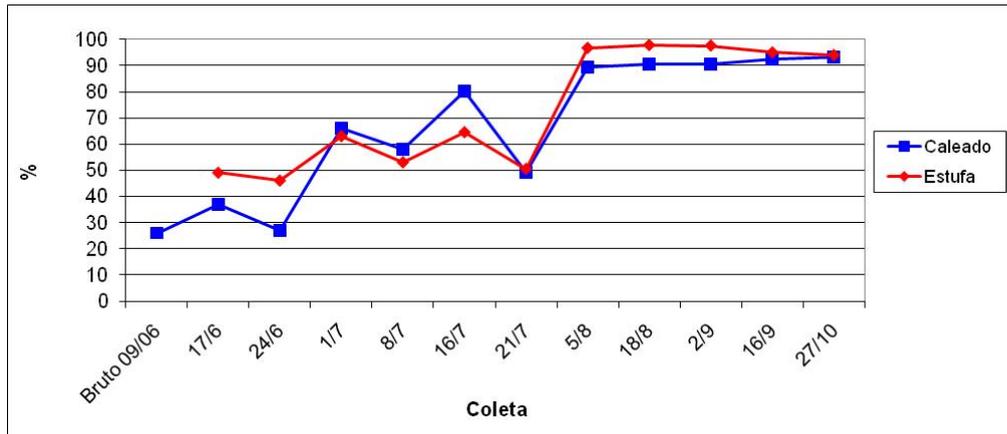


Figura 2.15 – Teor de sólidos totais (%) do lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 1.

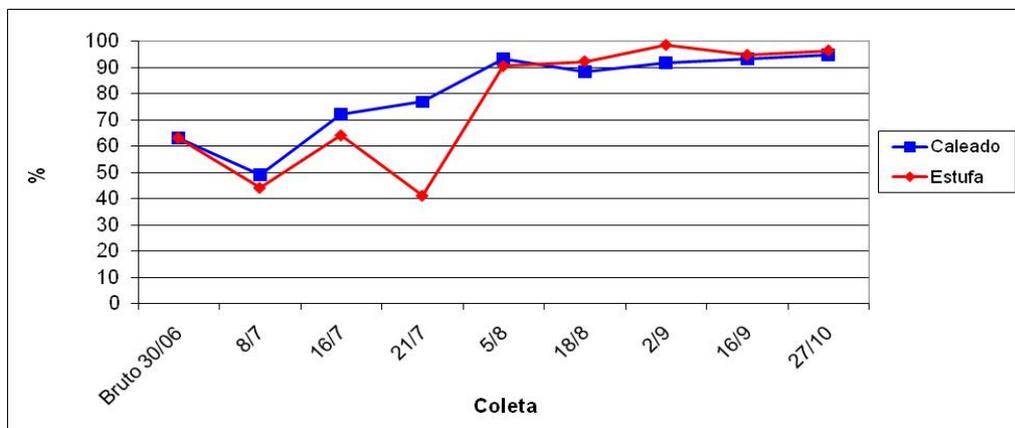


Figura 2.16 – Teor de sólidos totais (%) do lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 2.

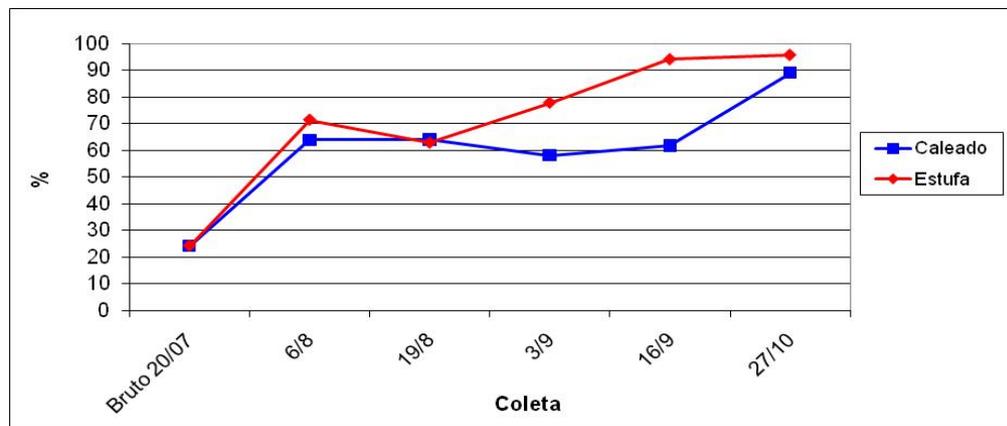


Figura 2.17 – Teor de sólidos totais (%) do lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 3.

#### 2.5.4. pH

A adição de cal na proporção de 50% proporcionou elevação praticamente imediata do pH para valores próximos a 12 (foram realizadas medidas de pH uma e 24 horas após a adição de cal), e esses valores se mantiveram por mais de 60 dias (figuras 2.18, 2.19 e 2.20). Algumas oscilações entre as coletas podem ter origem na homogeneização da amostra e na presença de ‘pedras’ de cal que podem alterar o resultado, conforme observado por Godinho (2003).

No lodo tratado em estufa o pH manteve-se em torno de 7 nas duas primeiras semanas, a partir de quando se nota tendência de queda gradual e de estabilização em valores próximos a 5,5 e 6 ao final dos experimentos (figuras 2.17, 2.18 e 2.19). Comportamento similar foi verificado por Comparini e Alem Sobrinho (2002): pH do lodo em torno de 7 após o descarte e até as duas primeiras semanas em estufa. No Lote 3 (figura 2.19) foi verificada elevação do pH até 8 na primeira semana, mas com retorno aos patamares encontrados nos lotes 1 e 2 a partir da análise seguinte. A queda do pH se deve à atividade microbiana, com formação de ácidos voláteis.

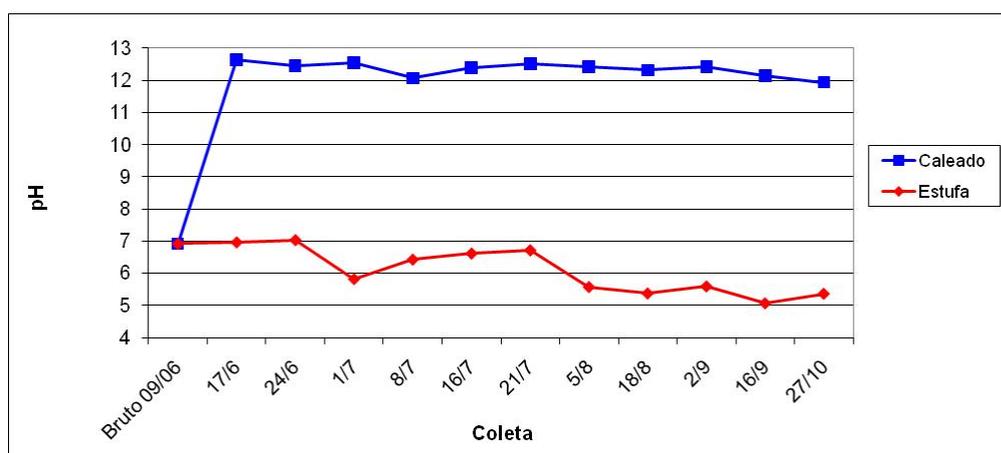


Figura 2.18 – Valores de pH do lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 1.

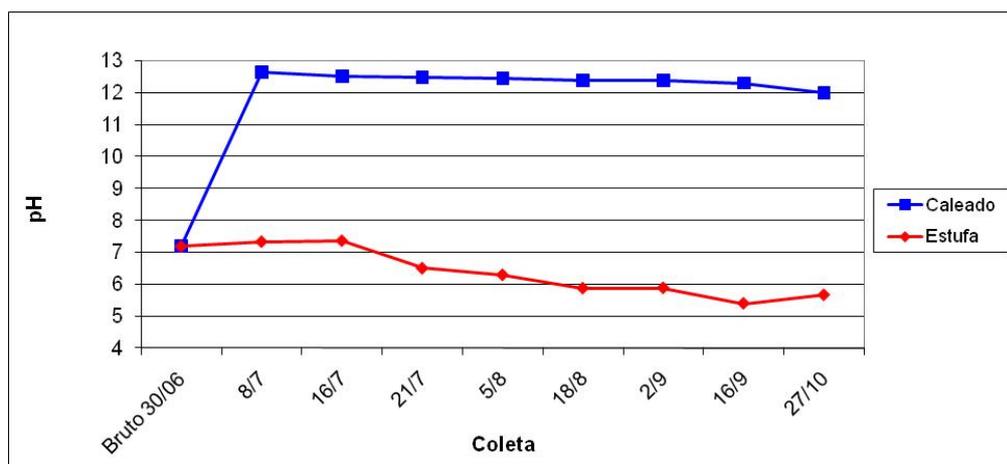


Figura 2.19 – Valores de pH do lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 2.

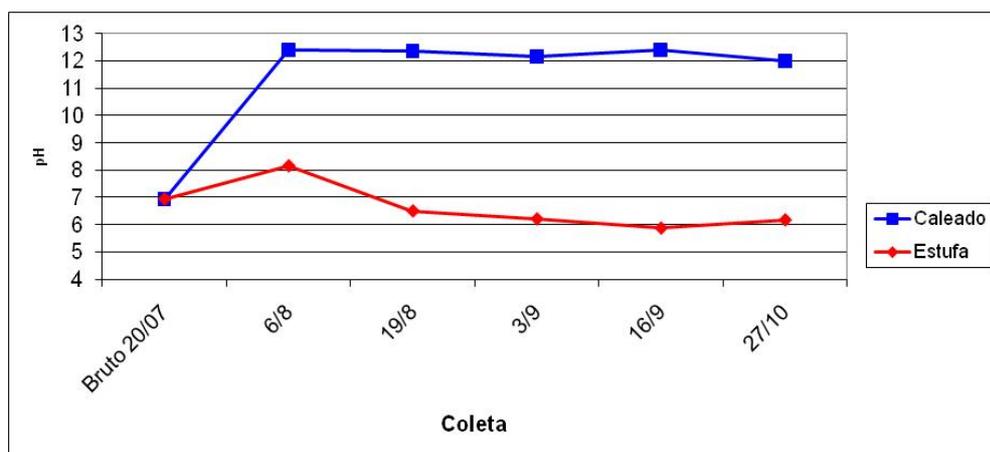


Figura 2.20 – Valores de pH do lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 3.

### 2.5.5. Coliformes totais, *E.coli* e *Salmonella*

A pesquisa de salmonela foi realizada em sete, quatro e três amostras, respectivamente, nos lotes 1, 2 e 3 ao longo do período de monitoramento desses lotes, mas apenas no lodo bruto do lote 3 foi detectada a presença desse organismo.

Nas figuras a seguir são apresentados os resultados do monitoramento de coliformes totais e *E.coli*. Coliformes totais (CT) não é

um parâmetro de controle estabelecido Conama 375/2006, mas foram incluídos como informações adicionais e até pelo fato de que o método analítico utilizado fornece resultados simultâneos de CT e *E. coli*. Quando por diluição insuficiente das amostras os resultados foram expressos como > NMP g/ST, este valor de número mais provável foi incluído nos gráficos, mais especificamente: (i) coliformes totais - Lote 1, análises dos dias 17/06, 24/06, 01/07, 08/07, 16/07, 21/07 e 02/09 do lodo de estufa (Figura 2.21); Lote 2, análises dos dias 08/07, 16/07, 21/07 e 02/09 do lodo de estufa (Figura 2.22); Lote 3, análises dos dias 20/07 e 03/09 do lodo em estufa e análises dos dias 20/07 e 27/10 do lodo caleado (Figura 2.23); (ii) *E.coli* - Lote 1, análise dia 16/07 do lodo de estufa (Figura 2.24); Lote 2, análise dia 02/09 do lodo de estufa (Figura 2.25).

Neses gráficos, cada dado representa a média aritmética dos resultados de duplicatas de cada amostra. As linhas descontínuas se devem a falhas na sequência das amostragens e, ou a problemas analíticos.

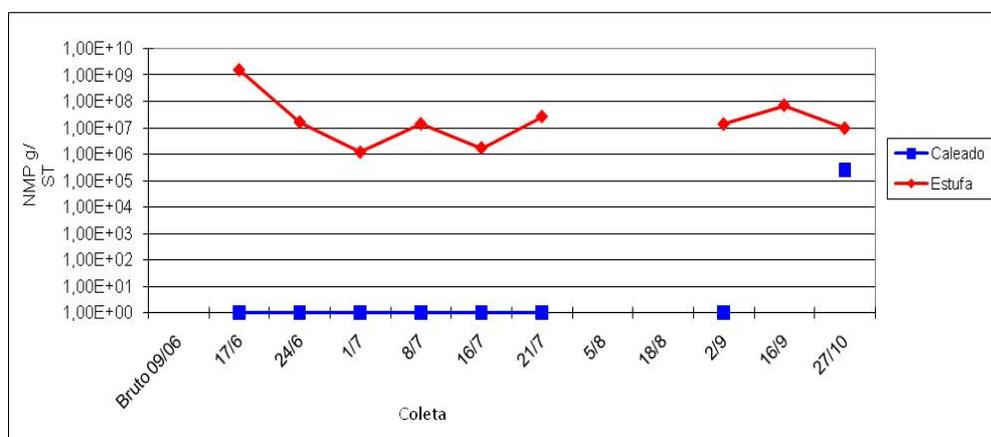


Figura 2.21 – Concentrações de coliformes totais no lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 1.

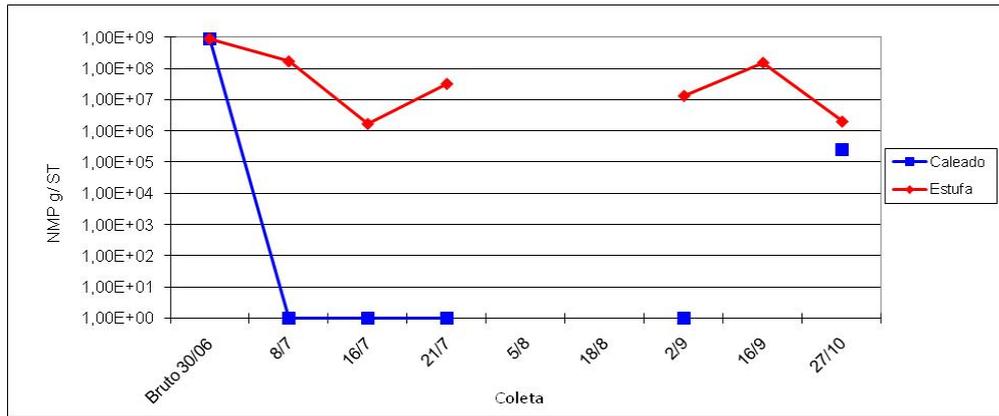


Figura 2.22 – Concentrações de coliformes totais no lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 2.

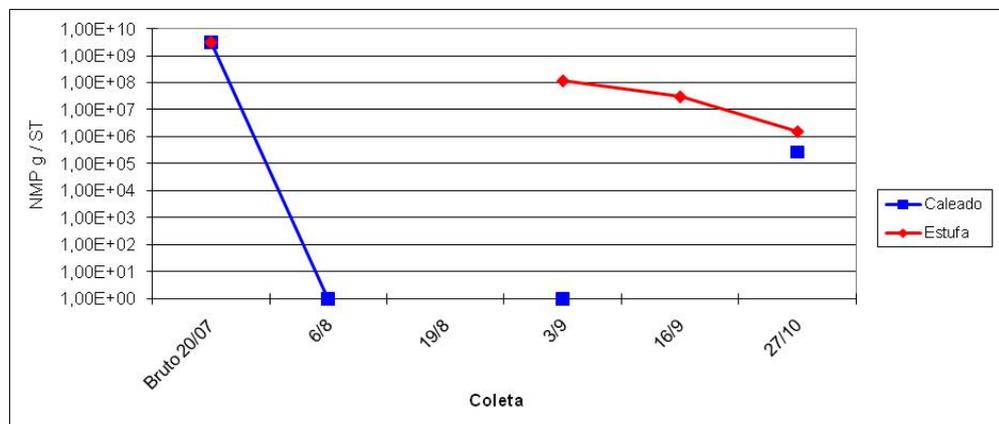


Figura 2.23 – Concentrações de coliformes totais no lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 3.

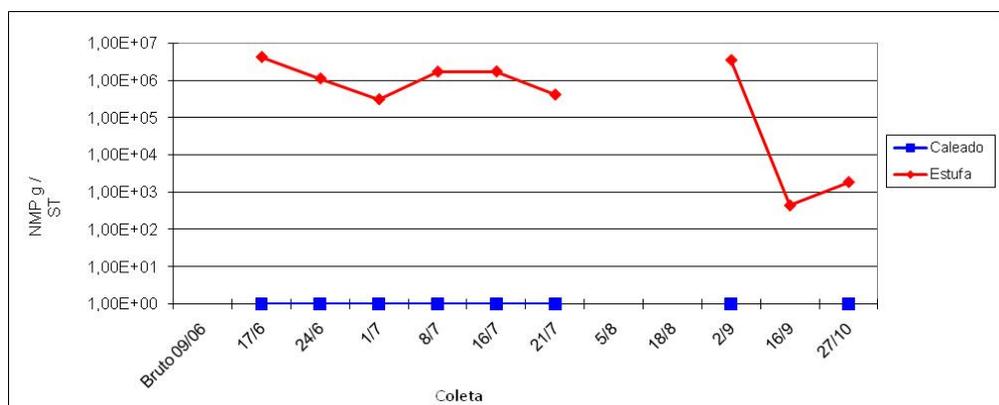


Figura 2.24 – Concentrações de *E.coli* no lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 1

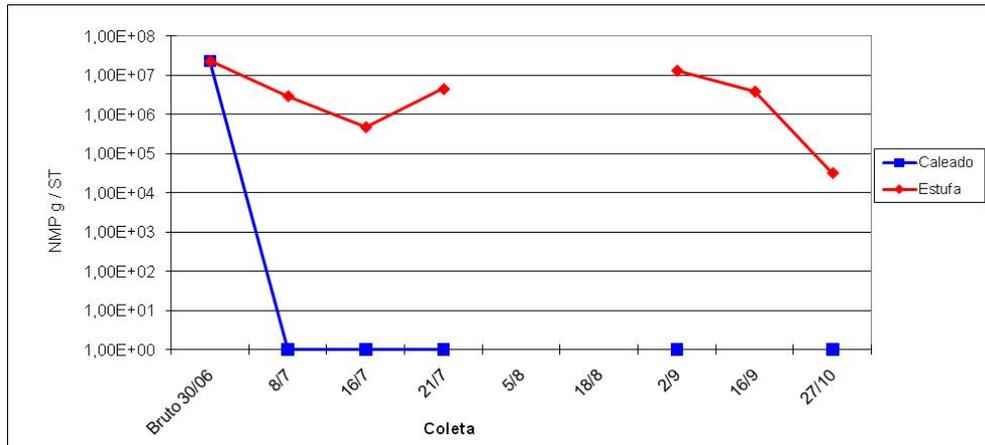


Figura 2.25 – Concentrações de *E.coli* no lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 2.

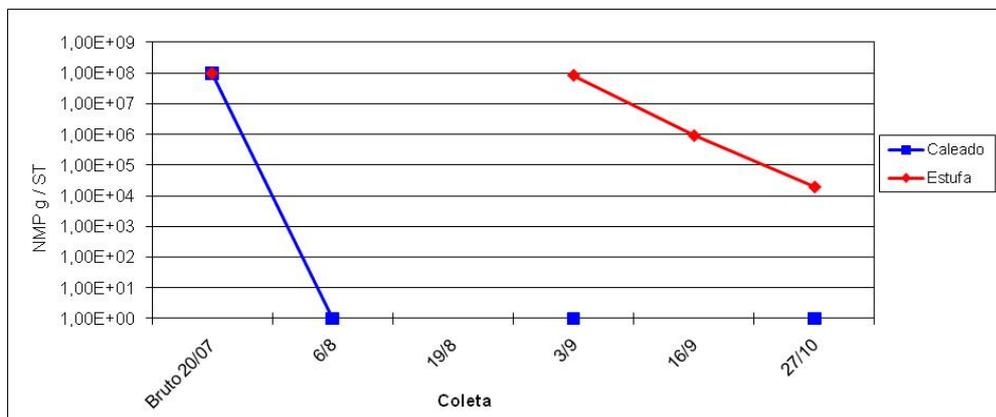


Figura 2.26 – Concentrações de *E.coli* no lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 3.

No lodo caleado ocorreu eliminação muito rápida das populações de coliformes totais e *E.coli* (figuras 2.21 a 2.26), evidenciando a eficácia desse processo de higienização para obtenção de lodo classe A (em termos de qualidade bacteriológica) em curto espaço de tempo (amostras foram coletadas em até uma hora após a caleação).

As contagens de *E. coli* permaneceram abaixo dos limites de detecção durante todo o período de monitoramento dos três lotes de lodo caleado. Todavia, na última análise realizada nos três lotes as contagens de coliformes totais apresentaram elevação brusca alcançando valores da

ordem de  $10^5$  organismos / g ST (figuras 2.21, 2.22 e 2.23). Tais resultados, inesperados, podem estar relacionados à: (i) como o lodo já se encontrava estabilizado, isso propiciou o surgimento de um biofilme na camada superficial, incentivado pela invasão de vegetais rasteiros (capim brachiaria e gramínea) (Figura 2.27), favorecendo eventualmente a atividade de seres vivos naquele ambiente, ou (ii) Ramirez e Malina (1980) salientam que caso o pH atinja valores inferiores a 11,5 é possível ocorrer recolonização de bactérias.



Figura 2.27- Vegetação com crescimento em direção ao interior da casa de lodo caledado.

De toda forma, o rápido decaimento e a efetiva inativação de bactérias em elevados valores de pH são relatados em outros trabalhos. Segundo Farrell *et al.* (1974) e Pedersen (1983), citados por Bitton (2005), valores de pH acima de 10,5 são suficientes para alcançar completa inativação bacteriana. Na Alemanha, *Salmonellae* foram completamente inativadas com elevação do pH para 12,8 após 3 h da adição de cal (PFUDERER, 1985, citado por BITTON, 2005). Parmar *et al.* (2001) investigaram a elevação do pH, associado à atividade enzimática e ao aumento da temperatura, com a morte de patógenos. O pH ajustado para 10 por 24 h a 23°C ou 3 h a 50°C resultou na eliminação de coliformes, mas *Salmonella* ainda persistiu. Condições de pH 12 por 48 h a 23°C ou 3 h a 60°C resultaram na eliminação completa de coliformes e de *Salmonella*.

Entretanto, há que se registrar que Bastos *et al.* (2007), trabalhando com o mesmo tipo de lodo e na mesma unidade experimental do presente estudo, observaram decaimento mais lento de coliformes totais e *E. coli*. Com aplicação de cal a 30% do peso seco em lodo com 74% de umidade, ao final de 90 dias as populações remanescentes eram de  $1,49 \times 10^4$  CT / g ST e  $9 \times 10^1$  *E.coli* / g ST; com aplicação de cal a 40% do peso seco em lodo com 72% de umidade, ao final de 90 dias ainda restavam  $1,8 \times 10^2$  CT / g ST e  $9 \times 10^1$  *E.coli* / g ST; com aplicação de cal a 50% do peso seco em lodo com 73% de umidade, ao final de 60 dias foram encontrados  $3,2 \times 10^1$  CT / g ST e  $0,9$  *E.coli* / g ST. Não obstante, em todos os tratamentos o decaimento inicial foi rápido e o padrão Classe A para *E.coli* ( $> 10^3$  org. / g ST) foi alcançado em aproximadamente 10 dias após a adição de cal.

Por fim, é preciso registrar que, como já referido anteriormente, a inativação de organismos patogênicos em processos de caleação é resultado conjunto dos efeitos da elevação do pH e da temperatura e da liberação de amônia (PECSON *et al.*, 2007). Entretanto, os teores de amônia não foram monitorados durante os experimentos de caleação. Registre-se, porém, que os experimentos foram conduzidos em período de inverno e com baixa incidência solar no decorrer do dia.

No lodo tratado em estufa o decaimento bacteriano se deu de forma lenta e gradual e ao final do monitoramento de todos os lotes ainda foram encontradas populações remanescentes da ordem de  $10^6$ - $10^7$  CT / g ST e  $10^3$ - $10^5$  *E.coli* / g ST (figuras 2.21 a 2.26). A fase final do acompanhamento dos três lotes (setembro) foi marcada por elevação da temperatura ambiente (final da estação de inverno) e isso, provavelmente, contribuiu para um decaimento mais intenso, mas mesmo assim o padrão Classe A de  $> 10^3$  *E.coli* / g ST foi alcançado apenas pontualmente na análise do dia 16/09 do Lote 1(Figura 2.24).

Resultados similares são relatados por Comparini e Além Sobrinho (2002), ou seja, decaimento gradual de *E.coli* em lodo tratado em estufa e

populações residuais da ordem de  $10^1$ - $10^3$  *E.coli.* / g ST ao final de aproximadamente 90 dias. Os autores ajustaram modelos de regressão do decaimento bacteriano em função da umidade e do tempo de secagem, destacando que o decaimento até valores abaixo de  $10^3$  *E.coli.* / g ST somente foi possível quando a umidade do biossólido atingiu valores da ordem de 10%, em cerca de 70 dias. No presente estudo, os teores finais de umidade foram inferiores a 10% (item 2.5.2), mas, como acima referido, as populações residuais de *E.coli* ao final de 75-120 dias foram superiores às obtidas por Comparini e Além Sobrinho (2002).

#### **2.5.6. Ovos viáveis de helmintos**

Os ovos mais comumente encontrados durante as análises foram de *Ascaris*, seguidos de Ancilostomídeos e, muito ocasionalmente, de *Trichuris*. Nas figuras a seguir os resultados são apresentados, genericamente, em termos de ovos viáveis de helmintos.

De início, cabe registrar que as contagens de ovos de helmintos no lodo foram sempre muito baixas (figuras 2.28 a 2.30). De um lado, isso é plenamente possível, pois depende da ocorrência nos esgotos e, portanto, da incidência de parasitoses na população contribuinte na época dos experimentos. Com efeito outros trabalhos também reportam contagens baixas de helmintos (Tsutiya, 2001; Corrêa *et al.*, 2007). Por outro lado, há que se registrar que Bastos *et al* (2007), trabalhando na mesma área experimental encontraram contagens bem mais elevadas no lodo, : 400-950 ovos / g ST no lodo descartado do reator UASB e 50-180 ovos / g ST no lodo retirado do leito de secagem. Entretanto, essas contagens são de ovos totais, enquanto no presente estudo os resultados se referem a ovos viáveis. Problemas analíticos não devem de todo ser descartados, muito embora os métodos de laboratório empregados sejam técnicas consolidadas e tenham sido executados com esmero.

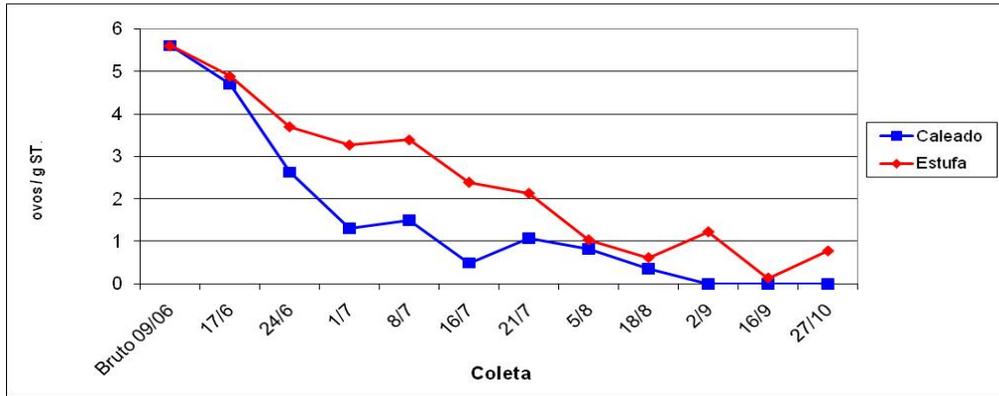


Figura 2.28 – Contagens de ovos viáveis de helmintos no lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 1.

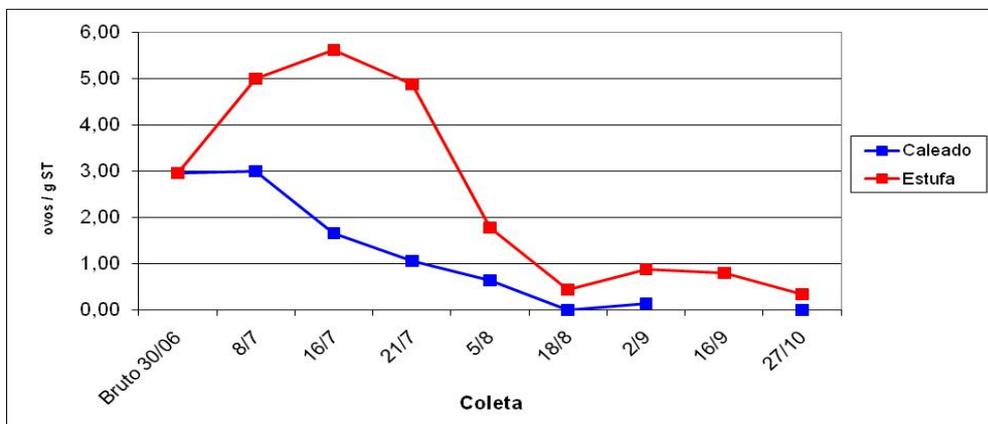


Figura 2.29 – Contagens de ovos viáveis de helmintos no lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 2.

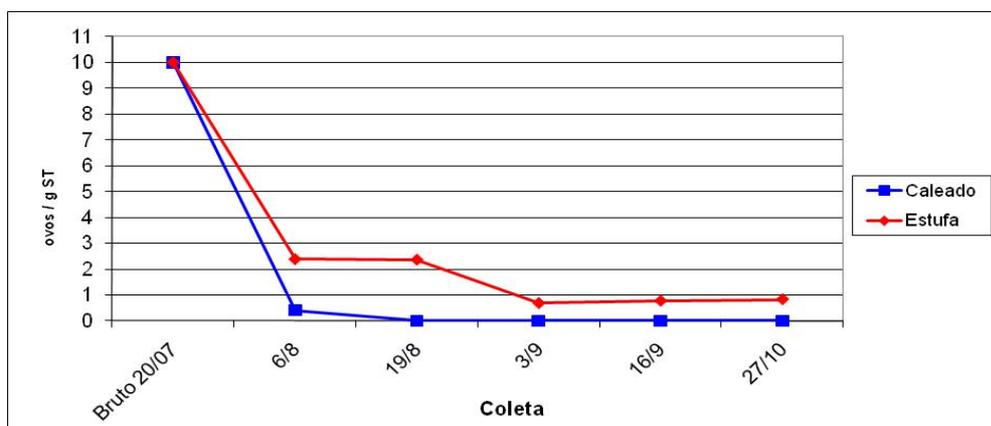


Figura 2.30 – Contagens de ovos viáveis de helmintos no lodo ao longo dos processos de caleação e secagem em estufa, Lote 3.

O decaimento dos ovos de helmintos no lodo caleado foi mais rápido do que no lodo de estufa. No Lote 3 (Figura 2.30) o decaimento foi mais intenso, alcançando contagem de 0,41 ovo / g ST já na primeira análise do lodo caleado (15 dias após a aplicação de cal) e valores não detectáveis a partir da análise seguinte (30 dias após a aplicação de cal). Nos lotes 1 e 2 (figuras 2.28 e 2.29), o decaimento foi mais gradual, sendo que valores não detectáveis foram alcançados em 80 e 75 dias, respectivamente. O aparente aumento do número de ovos na fase inicial do tratamento em estufa do Lote 2 pode ser creditado à problemas de homogeneização das amostras no momento de coleta ou de processamento em laboratório.

No já citado trabalho de Bastos *et al.* (2007) na mesma unidade experimental do presente estudo, com aplicação de 30-40% de cal em relação ao peso seco do lodo as contagens de ovos de helmintos caíram de 26-29 para 5,7-13 ovos / g ST em 10 dias após a aplicação de cal, mas permaneceram em torno de 1,5-2 ovos / g ST por cerca de 80 dias adicionais; com a aplicação de 50% de cal, as contagens iniciais de 7 ovos / g ST caíram a níveis não detectáveis em mais 30 dias.

Mais uma vez cabe citar que o decaimento de ovos de helmintos em processos de caleação é resultado conjunto dos efeitos da elevação da temperatura, do pH e da liberação de amônia. Maya *et al.* (2008) verificou que não houve danos a membrana quando os ovos estiveram expostos a temperatura abaixo dos 40°C. Já com elevação da temperatura e perda de umidade, a camada lipídica altera a permeabilidade e o material interno é perdido. O pH, quando maior que 12, promove a desnaturação da membrana induzida pela alteração na permeabilidade.

Pecson *et al.* (2007) verificaram a influência desses parâmetros na taxa de inativação de ovos de helmintos em experimentos de bancada com amostras de lodo primário, com ajuste de pH (7 and 12) e de temperatura (20, 30, 40 e 50°C) e adição de amônia (0, 1000, e 5000 mg NH<sub>3</sub> / L). Para cada valor de pH e de amônia testado, cada acréscimo de 10°C de

temperatura reduziu significativamente o tempo necessário para 99% de inativação ( $t_{99}$ ). À 50°C o efeito da temperatura predominou sobre os do pH e da amônia, com  $t_{99}$  em torno de 100 minutos. Com 30 e 40°C, a elevação do pH de 7 para 12 reduziu o  $t_{99}$ , mas com a temperatura de 20°C o efeito do pH não se fez sentir ao longo de 80 dias (inativação muito pequena). Com as temperaturas mais baixas a adição de amônia provocou reduções drásticas do  $t_{99}$ : de 230 para 25 dias com pH 12 e 20°C; de 24 para 4,8 dias com pH 12 e 30° e de 3,4 para 0,39 dias com pH 12 e 40°C.

Como já referido, os teores de amônia não foram mensurados no presente trabalho e assim esse efeito permanecerá inexplicado. Não obstante, cabe notar que os valores de pH foram sempre elevados ao longo de todo o tratamento por caleação (em torno de 12). As temperaturas mais elevadas durante o tratamento do Lote 3 podem ajudar a explicar o decaimento mais rápido em relação aos demais lotes.

O tratamento do lodo em estufa apresentou inativação mais lenta de ovos de helmintos e após 90 dias ainda foram detectados ovos viáveis nas amostras dos três lotes. O padrão Classe A de < 0,25 ovo / g ST não foi alcançado de forma consistente em nenhum lote (apenas na análise do dia 16/09 do Lote 1, Figura 2.28).

No já citado trabalho de Comparini e Além Sobrinho (2002), a partir de concentração média inicial de 58,36 ovos / g ST, verificou-se a ausência de ovos viáveis ao final de, respectivamente, 71, 56 e 70 dias (repetições dos experimentos). Os teores de umidade do bioestabilizado nesses casos eram de 12, 28 e 11,45%. Ou seja, a inativação de ovos de helmintos em tratamento em estufa tende mesmo a ser lento. Entretanto, outros autores obtiveram maior êxito, como o trabalho de Lima *et al.* (2007) na região metropolitana de Vitória, que obtiveram bioestabilizado classe A em estufa com apenas 42 dias.

## 2.5.7. Caracterização química dos biossólidos

A Tabela 2.10 apresenta os resultados das análises químicas realizadas de forma a caracterizar os biossólidos produzidos tendo em vista sua utilização florestal (produção de mudas de eucalipto).

Tabela 2.10 – Caracterização química dos biossólidos produzidos por caleação e secagem em estufa.

Tipo de lodo	pH	N	P	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup> Al
	H <sub>2</sub> O	dag kg <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			
Caleado	8,24	1,55	22,5	379	16,37	2,05	0,0	0,0
Estufa	6,32	3,24	170	661	10,72	2,9	0,0	7,4

Tabela 2.10 – Caracterização química dos biossólidos produzidos por caleação e secagem em estufa (continuação).

Tipo de lodo	SB	(t)	(T)	V	m	M.O	P <sub>rem.</sub>	Zn	Fe	Mn	Cu
	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			%		dag kg <sup>-1</sup>	mgL <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>			
Caleado	19,39	19,39	19,39	100,0	0,0	35,1	13,2	7,2	29,8	3,2	7,28
Estufa	15,31	15,31	22,71	67,4	0,0	42,2	38,6	-	481,7	36,6	53,1

pH em água, KCl e CaCl<sub>2</sub> - Relação 1:2,5; P - Na - K - Fe - Zn - Mn - Cu – Extrator Mehlich 1; Ca - Mg - Al - Extrator;; KCl - 1mol/L; H + Al – Extrator Acetato de Cálcio 0,5mol/L - pH 7,0; B - Extrator água quente; S - Extrator - Fosfato monocálcico em ácido acético ; Mat. Org. (MO) = C.Org x 1,724 - Walkley-Black; ISNa - Índice de Saturação de Sódio; SB = Soma de Bases Trocáveis; CTC (t) - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; CTC (T) - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; V = Índice de Saturação de Bases; m = Índice de Saturação de Alumínio. P-rem = Fósforo Remanescente

Como já tinha sido observado por Bastos *et al.* (2007) em lodos de mesma origem e biossólidos produzidos em condições semelhantes às do presente estudo, o lodo tratado em estufa apresentou melhores características químicas do que o lodo caleado: teores mais elevados de macro (NPK) e de micronutrientes (Fe, Mn e Cu) e de matéria orgânica. Como discutido na revisão de literatura a adição de cal provoca redução do teor de matéria orgânica, de solubilização do fósforo e perdas de nitrogênio

por volatilização da amônia. Por outro lado, naturalmente, a adição de cal diminuiu a acidez potencial do biossólido (H + Al) e aumenta a soma de bases trocáveis (SB) e o índice de saturação de bases (V) (proporção de bases em relação à Capacidade de Troca de Cátions); no caso o ISB do biossólido caleado foi de 100%. Entretanto, a elevação excessiva do pH e do conteúdo de cálcio pode eventualmente constituir fator negativo.

A Tabela 2.11 apresenta os resultados de alguns metais analisados no lodo caleado e de estufa.

Tabela 2.11 – Metais presentes no biossólidos produzidos por caleação e secagem em estufa.

Tipo de lodo	Cr	Ni	Cd	Pb
	mg dm <sup>-3</sup>			
Caleado	2,51	0,16	ND	ND
Estufa	ND	3,26	0,16	0,23

ND: não detectado

As baixas concentrações de metais encontradas são consistentes com a origem do esgoto sanitário local, oriundo exclusivamente de residências Além disso, as concentrações inferiores de Ni, Cd e Pb no lodo caleado em relação ao lodo de estufa podem estar associados ao efeito da caleação, que conforme Andreoli (2001) promove a fixação de metais, e isso é também válido para o ferro, manganês e cobre; contudo, o mesmo não foi observado para o cromo.

## 2.6. Conclusões

O lodo retirado do leito de secagem apresentou concentrações de *E.coli* da ordem de  $10^7$ - $10^8$  organismos / g ST, mas em contrapartida contagens baixas de ovos de helmintos viáveis, 3-10 ovos / g ST. Ou seja, antes da higienização o lodo já apresentava qualidade compatível com o padrão Classe B de ovos de helmintos (<10 ovos / g ST).

O tratamento do lodo por caleação levou a níveis não detectáveis de populações de *E.coli* imediatamente após a mistura com a cal, ou seja, o efeito foi tão intenso sobre a inativação de bactérias que a produção de lodo Classe B praticamente não ocorreu e o processo resultou quase automaticamente na produção de lodo Classe A. O tratamento do lodo por caleação resultou também em inativação efetiva de ovos de helmintos, embora bem mais lenta que a de *E.coli*; o padrão de lodo Classe A (< 0,25 ovos / g ST) foi obtido em até 30 dias.

O tratamento do lodo por secagem em estufa resultou em decaimento bacteriano e inativação de ovos viáveis de helmintos de forma lenta e gradual, com dificuldade em se estabelecer o padrão Classe A mesmo com teores de umidade inferiores a 10% ao final dos experimentos.

Em resumo, por meio da caleação (50% CaO), o padrão de biossólido Classe B foi alcançado em 12 e sete dias, respectivamente no Lotes 1 e nos lotes 2 e 3; a condição de Classe A foi obtida aos 70, 62 e 29 dias, respectivamente. No tratamento em estufa, a Classe B foi alcançada nos lotes 1, 2 e 3 com 42, 35 e 56 dias, respectivamente; a condição de Classe A demandou 100 dias para o Lote 1 e não foi alcançada aos 117 e 97 dias de acompanhamento nos lotes 2 e 3, respectivamente.

Em ambos os processos de higienização não foi viável a manipulação do biossólido antes de 40 dias de armazenamento, devido ao elevado teor de elevada umidade (por vezes, a 50%), mesmo quando este já se encontrava estabelecido como Classe A ou B, o que demandou procedimentos adicionais de condicionamento do biossólido (moagem) para posterior enchimento dos tubetes para plantio de mudas de eucalipto.

Tendo em vista o uso florestal (produção de mudas), o tratamento do lodo por secagem em estufa resultou em biossólidos com propriedades químicas melhores do que o produzido por caleação.

## 2.7. Referências

ANDA - ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. *Anuário da Associação Nacional para Difusão de Adubos*. 2002. Disponível em: < <http://www.anda.org.br/home.aspx> >. Acesso: 28 Out. 2009.

ANDA - ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. *Principais indicadores do setor de fertilizantes*. 2009. Disponível em: < <http://www.anda.org.br/estatisticas.aspx> >. Acesso: 20 Out. 2009.

ANDREOLI, C. V. (Coord.). *Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura*. Curitiba: Sanepar, 98 p. 1999.

ANDREOLI, C.V., BONNET, B.R.P. (ed.). *Manual de métodos para análises microbiológicas e parasitológicas em reciclagem agrícola de lodo de esgoto*. Curitiba: Sanepar, 85 p. 2000.

ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; TELES, C. R.; CHERUBINI, C.; BERNET, P. M.; FAVARIN, F.; CASTRO, L. R.. Avaliação da eficiência do uso de estufa plástica, revolvimento de lodo e injeção de calor na secagem e desinfecção de lodo anaeróbio em leito de secagem. In: SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, IX, Porto Seguro – BA. *Anais...* Rio de Janeiro: Abes, 2000a. (CD ROM).

ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; TELES, C. R.; CHERUBINI, C.; BERNET, P. M.; FAVARIN, F.; CASTRO, L. A. R. Operacionalização das alternativas de desinfecção e secagem de lodo digerido anaerobicamente. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE MICROBIOLOGIA APLICADA AO SANEAMENTO, I. Vitória - ES. *Anais...* Vitória: Abes, 2000b. (CD ROM).

ANDREOLI, C. V. (coord.). *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. Rio de Janeiro: Abes, RiMa, 282p. 2001.(Projeto Prosab).

ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNÁNDEZ, F. (org.). *Reciclagem de biossólidos. Transformando problemas em soluções*. Curitiba: Sanepar, Finep, 288p. 2001.

APHA - American Public Health Association; AWWA - American Water Works Association; WEF - Water Environment Federation. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20th ed. New York: APHA, AWWA, WEF, 1998.

ARGEL, K. R. V. *Caracterização de cenários de exposição a perigos microbiológicos relacionados ao uso agrícola de biossólidos*. 2010. 111f. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária) - Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Medicina Veterinária, Viçosa-MG, 2010.

ASSUNÇÃO, F. A. L.; HENRIQUE, C. S. *Gerenciamento do lodo da ETE Violeira visando o uso agrícola*. 2006, 79f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG, 2006.

BASTOS, R.K.X; MOUNTEER, A.H; NASCIMENTO, L.E. *CIV 442 – Qualidade da Água. Apostila de aulas teóricas. Parte I*. [sd] 2003a, 39p. Disponível em:

<<https://www2.cead.ufv.br/sistemas/pvanet/files/conteudo/1005/ApostiladeAulasteoricasparte1.pdf>>. Acesso: 12 jan. 2009.

BASTOS, R. K. X.; ANDRADE NETO, C.O.; CORAUCCI FILHO, B.; MARQUES, M.O. Disposição no solo como método de tratamento, destino final ou reciclagem de esgotos sanitários. In: BASTOS, R. K. X. (Coord). *Utilização de esgotos tratados em fertirrigação, hidroponia e piscicultura*. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003b. p. 1-22 (Projeto Prosab).

BASTOS, R. K. X.; ANDRADE NETO, C.O.; BEVILACQUA, P.D.; von SPERLING, M. Utilização de esgotos sanitários em irrigação. Aspectos sanitários. In: BASTOS, R. K. X. (Coord). *Utilização de esgotos tratados em fertirrigação, hidroponia e piscicultura*. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, p. 23-59. 2003C. (Projeto Prosab)

BASTOS, R. K. X.; ASSUNÇÃO, F. A. L.; ROSA, A. P.; HENRIQUE, C. S.; SOUZA, A. C. S. Gerenciamento do lodo em um sistema UASB + BF. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, v.1, n.2. p 1-7, 2007.

BASTOS R. K. X, BEVILACQUA P. D.; DIAS, G. M. F.; BARONY, F. J. A. Análise crítica da legislação brasileira para uso agrícola de lodos de esgotos na perspectiva da avaliação quantitativa de risco microbiológico. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, v.2, n.1, p. 143-149, 2009.

BASTOS, R. K. X. *Quantitative microbial risk analysis applied to biosolids use in agriculture: a state of the art review*. 2010, 67f. Monografia (Pós doutorado) – School of Civil Engineering, University of Leeds, Leeds, UK. 2010.

BITTON, G. *Wastewater microbiology*. 3<sup>rd</sup> ed. Gainesville, Florida: Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, 765 p. 2005.

BOARETT, W. A.; SOUZA, C.M.; WRUCK, F.J. Índice de erosividade das chuvas para Viçosa. *Revista Ceres.*, v.45, n.248, p. 193-201, 1998.

BONNET, B. R. P.; WISNIEWSKI, C.; REISSMANN C. B.; NOGUEIRA ,A. C., ANDREOLI C.V.; BARBIERI, S. J. Effects of substrates composed of biosolids on the production of *Eucalyptus viminalis*, *Schinus terebinthifolius* and *Mimosa scabrella* seedlings and on the nutritional status of *Schinus terebinthifolius* seedlings. *Water Science and Technology*, v.46, n. 10, p.239–246, 2002.

BONILLA, N. V.; CAMPEROS, E. R. Secador solar de lodos residuales municipales. In: SIMPÓSIO INTERAMERICANO DE BIOSÓLIDOS, VI, Rio de Janeiro, 2008. *Anais...*Rio de Janeiro: Abes, 2008 (CD ROM).

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 375 de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília, DF: *Diário Oficial da União*, 30 ago., p.141-146. 2006.

BUENO, R. C. R. Processo de redução de patógenos em biossólido com a utilização de energia solar (estudo de caso). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22 Joinville - SC. 2003. *Anais...*Rio de Janeiro: Abes, 2003 (CD ROM).

CAMPOS, J. R. (Coord.). *Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo*. Rio de Janeiro: Abes, 464 p. 1999. (Projeto Prosab).

CHERNICHARO, C, A, L. *Reatores anaeróbios*. 2ª ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 380 p. 2007. (Série: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, 5)

COMPARINI, J, B. *Estudo do decaimento de patógenos em biossólidos estocados em valas e em biossólidos submetidos à secagem em estufa agrícola*. 2001. 282f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

COMPARINI, J. B.; ALÉM SOBRINHO, P. Decaimento de patógenos em biossólidos submetidos à secagem em estufa agrícola. In: Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 28, Cancún, Mexico. 2002. *Anais...* Mexico DF: Aidis, 2002 (CD ROM).

CORRÊA, R. S.; CORRÊA, A. S. *Valoração de biossólidos como fertilizantes e condicionadores de solos*. *Sanare*, v.16, n. 2, p. 49-56, 2001.

CORRÊA, R. S.; FONSECA, Y. M. F.; CORRÊA, A. S. Produção de biossólido agrícola por meio da compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.11, n.4, p.420–426, 2007.

ESPERICUETA, A. D. C.; GONZÁLEZ, F. J. V. Desinfección de lodos residuales con alto contenido de salmonella mediante secado solar. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, XXXI. Santiago, Chile. 2008. *Anais...* Santiago, Chile: Aidis, 2008 (CD ROM).

ENVIRONMENT AGENCY. *The Microbiology of Sewage Sludge (2003) - Part 2 - Practices and procedures for sampling and sample preparation. Methods for the examination of waters and associated materials*. Bristol, UK: Environment Agency, 2003a. Disponível em: <[http://www.environment-agency.gov.uk/static /documents/Research/mss2003\\_\\_part\\_2\\_604558.pdf](http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Research/mss2003__part_2_604558.pdf)>. Acesso: 05 Jun. 2009.

ENVIRONMENT AGENCY. *The Microbiology of Sewage Sludge (2003) - Part 3 - Methods for the isolation and enumeration of Escherichia coli, including verocytotoxigenic Escherichia coli. Methods for the examination of waters and associated materials*. Bristol, UK: Environment Agency, 2003b.

Disponível em:

<[http://www.environmentagency.gov.uk/static/documents/Research/mss2003\\_part\\_3\\_604573.pdf](http://www.environmentagency.gov.uk/static/documents/Research/mss2003_part_3_604573.pdf)>. Acesso: 05 Jun. 2009.

ENVIRONMENT AGENCY. *The microbiology of sewage sludge (2004) - Part 4 - Methods for the detection, isolation and enumeration of Salmonellae. Methods for the examination of waters and associated materials*. Bristol, UK: Environment Agency, 2004. Disponível em:

<[\[agency.gov.uk/static/documents/Research/mss2004\\\_\\\_part\\\_4\\\_811642.pdf\]\(http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Research/mss2004\_\_part\_4\_811642.pdf\)>.](http://www.environment-</a></p></div><div data-bbox=)

Acesso: 05 Jun. 2009.

FARREL, J.B.; SMITH JR, J.E.; HATHAWAY, S.W.; DEAN, R.B. Lime stabilization of primary sludges. *Journal of Water Pollution Control Federation*, v.46, n.1, p 113–122. 1974, *apud* BITTON, G. *Wastewater microbiology*. 3<sup>rd</sup> ed. Gainesville, Florida: Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, 765 p. 2005.

FERNANDES, F.; ANDRAUS, S.; ANDREOLI, C.V. BONNET, B. R. P.; BORGES, J. C.; CANTO, L.A.; MEDEIROS, M. L. B. Eficiência dos processos de desinfecção do lodo da ETE-Belém com vista a seu uso agrícola. *Sanare*, v.5, n.5, p. 46-58, 1996.

FERNANDES, F. Estabilização e higienização de biossólidos. In: BETIOL, W.; CAMARGO, O.A (Ed.). *Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto*. Jaguariúna: Embrapa, p. 45-68. 2000.

GIROVICH, M. J. *Biosolids treatment and management: processes for beneficial use*. New York: Marcel Dekker, 453p. 1996.

GODINHO, V. M. *Estudo sobre a ocorrência de ovos de helmintos e viabilidade de Ascaris sp. em lodos anaeróbios in natura e submetidos à higienização por caleação e por tratamento térmico*. 2003. 139f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos

Hídricos). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte, 2003.

GONÇALVES, R. C.; LUDUVICE, M.; von SPERLING, M. Remoção da umidade de lodos de esgotos. . In: ANDREOLI, C. V.; von SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.) *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG; Curitiba: SANEPAR, p. 159-259. 2001a. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, 6).

GONÇAVES, R. C.; LUDUVICE, M.; LIMA, M. R. P.; RAMALDES, D. L. C.; FERREIRA, A. C.; TELES, C. R.; ANDREOLI, C. V. Desidratação de lodos de esgotos. In: ANDREOLI, C. V. (coord.). *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. Rio de Janeiro: Abes, RiMa, p. 77-106. 2001b. (Projeto Prosab).

GUEDES, M. C.; CRISTIANO ALBERTO DE ANDRADE, C. A.; POGGIANI, F.; MATTIAZZO, M. E. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, n.2, p.267-280, 2006.

HORN, S.; BARR, K.; MCLELLAN, J.; BUX, M. *Accelerated air drying of sewage sludge using a climate-controlled solar drying hall*. Brisbane Water. University of Hohenheim, Stuttgart, Germany. 2005. Disponível em: <[http://www.localgovernment.qld.gov.au/Portals/0/docs/local\\_govt/grants\\_subsidies/funding/awtt/solar\\_drying\\_hall\\_project\\_results\\_pt2.pdf](http://www.localgovernment.qld.gov.au/Portals/0/docs/local_govt/grants_subsidies/funding/awtt/solar_drying_hall_project_results_pt2.pdf)>. Acesso: 14 Fev. 2010.

IAP - INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. *Utilização agrícola de lodo de ETE*. Curitiba: IAP, 45p. 2003. Disponível em: <<http://www.ambientenet.eng.br/TEXTOS/LEGISLODO/IAP2003.PDF>> Acesso: 19 dez. 2009.

KATAN, J.; GREENBERGER, A.; ALON, H.; GRINSTEIN, A. Solar heating by polyethylene mulching for the control of diseases caused by soilborne pathogens. *Phytopathology*, v.66, p.683-688. 1976.

LeBLANC, R. J.; MATTHEWS, P.; RICHARD, R. P. *Global atlas of excreta, wastewater sludge and biosolids management. Moving towards the*

*sustainable and welcome uses of a global resource*. Nairobi: UN Habitat, 632p. 2006.

LIMA, M. R. P; ALÉM SOBRINHO, P; PRETTI, M. C.; CUNHA, E. R. Q. Lodo de esgoto – melhoria das suas características para disposição na agricultura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24. Belo Horizonte - MG. 2007. *Anais...*Rio de Janeiro: Abes, 2007 (CD ROM)

LIMA, M. R. P; ALÉM SOBRINHO, P.; CUNHA, E. R. Q.; VILELA, K.S.; LOUREIRO, L.F. Avaliação da qualidade do lodo de esgoto quando submetido à secagem/higienização em estufa agrícola. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*,v. 2, n 1, p. 41-49, 2009.

LOPES, A. S.; BASTOS, A. R. *Fertilizantes nitrogenados no Brasil: um problema de escassez*. Caderno de Informações Agronômicas. Universidade Federal de Lavras, 4 p. 2007.

LUDUVICE, M. Processos de estabilização dos lodos. In: ANDREOLI, C. V.; von SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.) *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG; Curitiba: SANEPAR, p. 123-157. 2001a. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, 6).

MAGNO, P. *Perspectivas de preços dos grãos para 2009: tendências*. Brasília: CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Diretoria de Logística e Gestão Empresarial – Digem. Superintendência de Gestão da Oferta – Sugof 2009. Disponível em:<[http://www.conab.gov.br/conabweb/download/cas/especiais/perspectivas\\_de\\_precos\\_de\\_graos\\_2009.pdf](http://www.conab.gov.br/conabweb/download/cas/especiais/perspectivas_de_precos_de_graos_2009.pdf)>. Acesso: 01 Agos. 2011

MAYA, C.; LUCARIO, S.; GALVÁN, M.; GAYOSSO, T.; NARANJO, R.; JUMÉNEZ, B. Estudio del mecanismo de inactivación de diferentes huevos de helmintos de importancia médica.. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, XXXI. Santiago, Chile. 2008. *Anais...* Santiago, Chile: Aidis, 2008 (CD ROM).

METCALF & EDDY INC. *Wastewater engineering, treatment and reuse*. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw Hill, 1819 p. 2003.

MEYER, K. B.; MILLER, K. D.; KANESHIRO, E. S. Recovery of *Ascaris* eggs from sludge. *The Journal of Parasitology*. v.64, n.2. p. 380-383. 1978.

NEVES, D. P. et al. *Parasitologia Humana*. 11 ed. Rio de Janeiro. Editora Atheneu, 498 p. 2002.

NÓBREGA, R. S. A. VILAS BOAS, R.S; NÓBREGA, J.C.A.; PAULA, A.M.; MOREIRA. F.M.S. Utilização de biossólido no crescimento inicial de mudas de aroeira (*Schinus terebynthifolius* Raddi). *Revista Árvore*, v.31, n.2, p.239-246, 2007.

NRC – NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Biosolids applied to land: advancing standards and practices*. Washington, DC: National Academy Press, 284p. 2002.

PARMAR, N.; SINGH, A.; WARD, O. P. Characterization of the combined effects of enzyme, pH and temperature treatments for removal of pathogens from sewage sludge. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. v.17, n.2, p.169-172. 2001.

PECSON, B. M.; BARRIOS, J. A.; JIMÉNEZ, B. E.; NELSON, K. L. The effects of temperature, pH, and ammonia concentration on the inactivation of *Ascaris* eggs in sewage sludge. *Water Research*. v. 41, n.13, p. 2893 – 2902, 2007.

PEDERSEN, D.C. Effectiveness of sludge treatment processes in reducing levels of bacteria, viruses, and parasites. In: WALLIS, P.M.; LEHMANN, D.L (Eds.). *Biological health risks of sludge disposal to land in cold climates*. Calgary, Canadá: University of Calgary Press, 1983, p. 9–31, *apud* BITTON, G. *Wastewater microbiology*. 3<sup>rd</sup> ed. Gainesville, Florida: Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, 765 p. 2005.

PINTO, M. T. Higienização de lodos. In: ANDREOLI, C. V.; von SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.) *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e

Ambiental, UFMG; Curitiba: Sanepar, p. 261-297. 2001. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, 6).

PFUDERER, G. Influence of lime treatment of raw sludge on the survival of pathogens, on the digestability of the sludge and on the production of methane: hygienic investigations, In: STRAUCH, D., HAVELAAR, A.H.; L'HERMITE, P. (Eds.) *Inactivation of microorganisms in sewage sludge by stabilization processes*. London: Elsevier,. 1985, p. 85–97, *apud* BITTON, G. *Wastewater microbiology*. 3<sup>rd</sup> ed. Gainesville, Florida: Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, 765 p. 2005.

PMV – Prefeitura Municipal de Viçosa. 2011. Disponível em <<http://www.vicosamg.gov.br/>>. Acesso: 16 Jan. 2011

RAMIREZ, A.; MALINA, J. F. Chemicals disinfect sludge. *Water and Sewage Works*, v.127, n. 4, p. 52-54, 1980.

ROCHA, A. L. C. L.; ALMEIDA, R. A.; SILVA, M. S.; NOVAIS, D. B. B. Higienização de lodo anaeróbio de esgoto por meio alcalino. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25. Recife - PE. 2009. *Anais...*Rio de Janeiro: Abes, 2009 (CD ROM).

SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto, Viçosa - MG. 2011. Disponível em: < <http://www.saaevicosacom.br/>>. Acesso: 02 Jan. 2011.

SOUZA JÚNIOR, J. O.; CARMELLO, Q. A. C.; FARIA, J. C. Características químicas do lixiviado na fase de enraizamento de estacas de cacau em substratos adubados com fósforo. *Revista Brasileira de Ciência Solo*, v. 32, n.4. p. 1573-1581. 2008.

TUNDISI, J. G. *Água no século XXI: enfrentando a escassez*. 2<sup>a</sup> ed. São Carlos: Rima, 256 p. 2005.

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

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *A plain English guide to the EPA, Part 503 Biosolids Rule*. Washington DC: US Environmental Protection Agency, Office of Wastewater Management, 1994 (EPA/832/R-93/003). Disponível em:

<<http://www.epa.gov/owm/mtb/biosolids/503pe/>>. Acesso: 16 Jan. 2010.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Environmental regulations and technology. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge (including domestic septage) under 40 CFR Part 503*. Cincinnati: USEPA, 2003. 186 p (EPA/625/R-92/013). Disponível em: <<http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/625r92013/625r92013.htm>>. Acesso em: 21 out 2009.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Test Methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods. SW 846. Method 9045 D - Soil and waste pH*. Washinton DC: USEPA, 2004.

Disponível em:

<[http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/online/9\\_series.htm](http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/online/9_series.htm)>.

Acesso em 15 Maio 2009.

von SPERLING, M. *Introdução a qualidade da água e ao tratamento de esgotos*. 3 ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 452 p. 2005. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas residuárias, 1).

von SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V.; von SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.) *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2001, p.17-68. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, 6).

TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J.; MELO, W.J.; MARQUES, M.O. (ed.). *Biossólidos na agricultura*. 1ª ed. São Paulo: Sabesp, 424 p. 2001.

VAZ, L. M. S.; GONÇALVES, J. L. M. Uso de biossólidos em povoamento de eucalipto: efeitos em atributos químicos do solo, no crescimento e na

absorção de nutrientes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, p.747-758, 2002.

ZERBINI, A. M.; CHERNICHARO, C. A. L. Metodologias para quantificação, identificação e análise de viabilidade de ovos de helmintos em esgotos brutos e tratados. In: CHERNICHARO, C. A. L. (Coord.). *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios*. Belo Horizonte: Abes, RiMa, p. 71-105. 2001.(Projeto Prosab).

## CAPÍTULO 3

### PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Eucalyptus urophylla* COM USO DE BIODISSÓLIDO

#### 3.1. Introdução

O eucalipto é uma árvore nativa da Austrália, Timor e Indonésia, sendo exótico em todas as outras partes do mundo. Os primeiros plantios datam do início do século XVIII, na Europa, na Ásia e na África, vindo a ser cultivado no Brasil a partir do século XIX. São mais de 600 espécies e dentre as mais cultivadas no Brasil incluem-se o *Eucalyptus grandis*, o *Eucalyptus camaldulensis*, o *Eucalyptus saligna* e o *Eucalyptus urophylla*. Além disso, têm sido desenvolvidos cruzamentos entre espécies, resultando em híbridos, como é o caso do *Eucalyptus urograndis* (*E. grandis* X *E. urophylla*). Dentre as diversas espécies, o *Eucalyptus urophylla* apresenta posição de destaque por apresentar rápido crescimento (podendo chegar a 30 a 50 metros de altura), moderada resistência a secas prolongadas e ampla diversidade de uso de sua madeira (SBS, 2007; CIB, 2008).

Dentre os diversos usos do eucalipto, destacam-se: extração de óleos essenciais, produção de celulose e papel, fabricação de móveis e laminados, emprego na construção civil, produção de carvão. No Brasil, os principais usuários são os setores de celulose e papel e de siderurgia, os quais respondem por, respectivamente, cerca de 70% e 20% do consumo de florestas de eucalipto (ABRAF, 2009). Porém, o interesse pela cultura do eucalipto não se restringe às grandes empresas, pois também para os pequenos produtores rurais essa atividade representa fonte de renda (RODIGHERI, 2000).

Segundo dados da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF), o plantio de eucalipto no Brasil atingiu a marca de 6.126.000 ha no ano de 2008, com acréscimo de 7,3 % em relação ao ano anterior. As plantações de eucalipto no Brasil desempenham importante papel sócio-econômico e em 2006 o setor de base florestal brasileiro contribuiu com 3,5% do PIB nacional, e foi responsável por 6,9 milhões de empregos, 7,3% das exportações do país e 1,4% da arrecadação tributária (SBS, 2007). Em termos de produtividade, registram-se grandes avanços nas últimas décadas, fruto de pesquisas e melhoramento genético. A produtividade média do eucalipto saltou de 26 m<sup>3</sup>/ha/ano em 1990 para 41 m<sup>3</sup>/ha/ano em 2006 (SBS, 2007).

O cultivo de eucalipto é, portanto, uma atividade de inegável importância econômica no Brasil. Todavia, frequentemente são levantadas polêmicas em torno da viabilidade ambiental da floresta de eucalipto, principalmente quanto a aspectos relacionados à monocultura (menor biodiversidade) e influência no regime hídrico (elevado consumo de água do solo). Porém, tais críticas têm encontrado contra-argumentos (ANESI, 2007; NOVAIS; 2009).

O uso de lodo de esgotos ou biossólidos como condicionador de solos, para recuperação de áreas degradadas ou produção agrícola constitui matéria já bastante explorada e devidamente registrada na literatura internacional e nacional, como, por exemplo: Melo *et al.* (2000), sobre níveis de fertilidade de solo tratado com lodo digerido para a produção de milho; Seliavanovskaya *et al.* (2003), sobre recuperação de áreas degradadas; Fia *et al.* (2005) sobre os efeitos de diferentes doses de lodo caledo nas características químicas do solo; Gadioli e Fortes Neto (2004) sobre produtividade de milho e de feijão adubados com biossólidos. A literatura também faz menção a vários trabalhos com emprego de biossólidos em plantações florestais e produção de mudas de espécies arbóreas, tais como: Poggianni e Benedetti (1999), Vaz (2000), Poggianni *et al.* (2000) e Guedes (2005) sobre aplicação em plantações de eucalipto; Bonnet *et al.* (2002) e Trigueiro (2002) sobre produção de mudas de

eucalipto, aroeira e mimosa; e Faustino *et al.* (2005) sobre produção de mudas de *Senna siamea* (espécie exótica utilizada na arborização de áreas verdes, praças e ruas da cidade do Recife).

Entretanto, em todo o mundo, o uso florestal de lodo de esgotos/biossólidos ainda não é explorado em pleno potencial, por exemplo, se comparado ao uso agrícola e mesmo a usos não-benéficos, tais como a disposição em aterros sanitários ou a incineração (LeBlanc *et al.*, 2006).

Além de uma breve revisão de literatura sobre o uso florestal de biossólidos, neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos experimentos de produção de mudas de eucalipto em viveiro, com o uso de biossólidos produzidos por meio de caleação e de secagem em estufa.

## **3. 2. Revisão de literatura**

### **3.2.1. Uso florestal de biossólidos**

A pesquisa sobre o uso de biossólidos em plantações florestais não é tão recente e trabalhos em países diversos têm registrado respostas positivas, demonstrando a viabilidade ecológica, silvicultural e econômica dessa prática. No Brasil, destaque deve ser dado ao trabalho desenvolvido pelo grupo de pesquisadores de da ESALQ/USP em curso desde 1998. (por exemplo, VAZ e GONCALVES, 2002; GUEDES, 2005; BARREIROS *et al.*, 2007; FIRME, 2009).

Como muitas vezes a silvicultura é praticada em solos de baixa fertilidade, o emprego de biossólidos leva ao melhor aproveitamento dos nutrientes pelas plantas e menores perdas por lixiviação, ou seja, a menores impactos ambientais. Segundo Poggiani *et al.* (2000), o lodo de esgoto apresenta vantagens em relação à adubação mineral devido à

forma lenta e contínua de liberação dos nutrientes para o solo e para o sistema radicular das árvores, e isso é vantajoso em culturas de ciclos longos. O eucalipto, por apresentar elevada taxa de crescimento e exportar grandes quantidades de nutrientes por ocasião da colheita, se apresenta como uma das espécies mais indicadas em processos de fitorremediação, incluindo a aplicação de biossólidos. Por exemplo, em estudo realizado na Estação Experimental de Ciências Florestais da ESALQ/USP, em Itatinga-SP, eucaliptos adubados com biossólido com  $10 \text{ t ha}^{-1}$ , aos sete anos de idade, haviam incorporado em sua biomassa lenhosa praticamente todo o nitrogênio adicionado (POGGIANI, 2006).

Embora a reciclagem de biossólidos em florestas seja amplamente divulgada em literatura, seu uso em produção de mudas florestais ainda é menos explorado

Trigueiro (2002), em experimentos conduzidos em viveiro em Botucatu - SP, avaliou o uso de substratos compostos pela mistura de diferentes proporções (80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60) de biossólidos com casca de arroz carbonizada, as quais foram comparadas ao substrato Multiplant<sup>®</sup> como meio de crescimento para produção de mudas de pinus e eucalipto (*Eucalyptus grandis* Hill, ex-Maiden, e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Morelet). Foram avaliados os seguintes parâmetros relativos ao crescimento das mudas: altura de planta (H); diâmetro de colo (D); relação H/D; produção de matéria seca de parte aérea e raiz; relação matéria seca de raiz/matéria seca de parte aérea; sobrevivência; qualidade de torrão; análise química do tecido vegetal de parte aérea e raiz; área foliar e teor de clorofila. Os resultados revelaram que mudas de eucalipto e pinus desenvolvidas em substrato contendo biossólido/casca de arroz carbonizada na proporção 50/50 e 40/60 apresentaram resultados satisfatórios quando comparados à testemunha. Doses superiores a 70% de biossólido foram prejudiciais ao desenvolvimento das mudas de ambas as espécies. Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que o uso de biossólidos para produção de mudas é bastante promissor, sendo, entretanto, necessária a realização de estudos mais aprofundados quanto

ao manejo mais adequado da adubação das mudas produzidas nesses substratos.

No estado do Paraná, Bonnet *et al.* (2002) avaliaram a produção de mudas de *Eucalyptus viminalis*, *Schinus terebinthifolius* e *Mimosa scabrella* com seis diferentes misturas de bio-sólidos tratados termicamente e compostados e substratos comerciais, vermicomposto e resíduos vegetais. As variáveis de controle foram: altura das mudas, diâmetro do caule, altura:diâmetro do caule, matéria seca (parte aérea e raiz), sobrevivência e estado nutricional. Em razão do elevado pH dos bio-sólidos tratados termicamente, sua utilização somente se mostrou viável em baixas proporções (15%). O bio-sólido compostado promoveu excelentes resultados quando o bio-sólido foi utilizado em proporções entre 30-60%.

Faustino *et al.* (2005), em Recife, avaliaram a viabilidade do uso de lodo de esgoto previamente higienizado por solarização como componente do substrato para produção de mudas de *Senna siamea* Lam. Foram testadas as seguintes proporções de lodo com solo: 0% (T1), 25% (T2), 50% (T3), 75% (T4) e uma mistura de 25% de lodo com 25% de pó de coco (T5). Em todos os tratamentos com lodo as mudas apresentaram desenvolvimento superior ao da testemunha, medida por meio da matéria seca. O tratamento T5 foi a que apresentou o melhor desenvolvimento das mudas, seguido daqueles com 75% (T4) e 50% (T3) de lodo.

Garcia *et al.* (2010) avaliaram a aplicação de lodo calcado (incorporação de cal virgem na proporção de 15% em peso seco de lodo) no desenvolvimento de mudas de *Eucalyptus grandis* no Espírito Santo. Os tratamentos foram constituídos pela aplicação de doses de lodo esgoto (0; 25; 50; 75 e 100 t ha<sup>-1</sup>) com períodos de incubação de 0; 20; 40; 60 e 80 dias. As variáveis de controle foram: área foliar, massa seca total, razão de área foliar e taxas de crescimento relativo e absoluto. A área foliar, a massa seca total e a razão de área foliar das plantas de eucalipto aumentaram, apresentando modelo tipo quadrático em função das doses do lodo aplicadas e atingindo valor máximo próximo à dose aplicada de 75

t ha<sup>-1</sup>. O aumento dos valores de razão de área foliar em decorrência do incremento das doses de bio sólido até próximo à dose de 75 t ha<sup>-1</sup> significa maiores ganhos de área foliar comparativamente ao de massa seca total. Por outro lado, a partir dessa dose aplicada, a situação se inverteu, ou seja, o ganho de massa seca tornou-se maior comparativamente ao de área foliar. Por sua vez, as taxas de crescimento relativo e absoluto, também de acordo com o ajuste de modelo quadrático, diminuiram em função do aumento das doses de bio sólido aplicadas até 25 t ha<sup>-1</sup>, aumentando a partir daí até a dose de 100 t ha<sup>-1</sup>. O período de incubação não proporcionou nenhuma alteração nas características avaliadas, exceto para área foliar que teve reflexo positivo, aumentando seus valores com o incremento dos dias.

### **3.2.2. Aspectos relacionados à produção de mudas florestais**

A qualidade das mudas é prerrogativa para o bom crescimento das árvores, sendo por isso necessário garantir as condições adequadas para a produção de mudas, incluindo a provisão balanceada de macro e micronutrientes, o fornecimento de água e o tipo de substrato utilizado.

Nos quadros 3.1.e 3.2 são destacados alguns aspectos de importância desses nutrientes para o desenvolvimento das plantas. O Quadro 3.3 traz informações sobre sintomas de deficiências nutricionais em plantas de eucalipto.

Quadro 3.1: Importância dos macronutrientes para as plantas.

Nutriente	Benefícios
N	<p>Componente da clorofila, enzimas, proteínas estruturais, ácidos nucléicos e outros compostos orgânicos.</p> <p>Proteção contra patógenos, pois estes necrosam principalmente plantas menos vigorosas e com deficiência em N.</p>
P	<p>Esse elemento não é lixiviado, mas incorpora-se á matéria orgânica e forma compostos com Ca, Fe e Al, sendo também fixado nos minerais de argila. Nessas condições, a liberação do P é lenta e há dúvidas se adubações com superfosfato por cobertura proporcionam disponibilidade durante a rotação da espécie, dada a imobilidade e fixação deste elemento no substrato.</p> <p>Portanto, onde necessário, o fertilizante fosfatado deve ser aplicado antes da semeadura. Em substratos com deficiência desse elemento, as mudas mostram desenvolvimento irregular, nas partes aérea e radicial.</p> <p>Em florestas plantadas, o P é o principal nutriente limitante do crescimento de árvores.</p>
K	<p>Desempenha inúmeros papéis, sendo um elemento regulador da síntese de carboidratos e do transporte de açúcar.</p> <p>Adequadas quantidades de K tomam as mudas mais resistentes a condições adversas de umidade e seca e menos susceptíveis ao "choque" ocasionado pelo plantio.</p> <p>Facilmente lixiviável em substratos arenosos</p> <p>Adubações por cobertura podem tomar-se necessárias durante o período de rotação.</p> <p>O uso de K, além do nível crítico, pode ocasionar sintomas de deficiência de Mg, especialmente em solos arenosos.</p>

Quadro 3.1: Importância dos macronutrientes para as plantas (continuação)

Ca	<p>Envolvido no metabolismo do N; necessário para o crescimento dos tecidos meristemáticos e desenvolvimento das mudas; importante para as funções das raízes</p> <p>Relacionado positivamente com o conteúdo de silte e argila. Portanto, as quantidades deste elemento variam com a textura dos substratos.</p> <p>Tem efeito na parede celular e a torna mais resistente a patógenos.</p>
Mg	<p>Importante na formação de clorofila.</p> <p>Serve como catalisador na transferência de fosfatos, além de ser envolvido em outras reações enzimáticas.</p> <p>Sua deficiência provoca clorose, nas folhas das mudas, semelhante á causada pela carência de nitrogênio.</p>
S	<p>Elemento essencial para a eficiente utilização de N pelas mudas.</p> <p>A relação N/S pode é um bom indicador da necessidade do enxofre.</p> <p>A maioria dos fertilizantes sulfurosos é altamente solúvel, portanto sujeitos á lixiviação.</p>

Fonte: ANDA (2000), Hoppe (2004), Melo *et al.* (2001), Zeitouni (2005), Andreoli *et al.* (1999)

Quadro 3.2 – Importância dos micronutrientes para mudas de espécies florestais

Micronutrientes	Importância para planta
Fe	Deficiência em Fe é uma das formas mais comuns de inadequada nutrição de micronutrientes, ocorrendo principalmente em substratos com valores mais elevados de pH, onde a absorção é inibida.
Mn	Geralmente, pequenas quantidades satisfazem as exigências nutricionais das espécies florestais. O Mn é essencial para a síntese de clorofila e pode afetar a disponibilidade de ferro.
Zn	Elemento essencial para muitas enzimas e para a transformação de carboidratos.
Cu	Desempenha importante papel no desenvolvimento de mudas, como ativador de atividades enzimáticas, mas é demandado em pequenas quantidades. Altos valores de P no substrato podem reduzir a absorção de Cu pelas mudas.
B	O único meio de retenção deste elemento é a matéria orgânica. Valores de pH acima de 6,0, em combinação com alto nível de Ca, resultam em menor disponibilidade de boro. Em quantidades excessivas é muito tóxico.
Mo	Importante para a fixação de N e também para a redução do nitrato.
Cl	Elemento essencial para a fotossíntese. O suprimento de Cl, por absorção da atmosfera, usualmente é suficiente para atender as necessidades nutricionais das espécies florestais..

Fonte: Hoppe (2004)

Quadro 3.3 – Deficiências nutricionais observadas em *Eucalyptus spp.*

Nutriente	Sintoma
N	Clorose uniforme nas folhas. Senescência precoce das folhas e redução de crescimento e produção de sementes.
P	As folhas apresentam crescimento reduzido, podendo ocorrer necrose.
K	Clorose nas pontas e margens das folhas e Senescência precoce das folhas. Árvores ficam mais sensíveis à deficiência hídrica do solo.
Ca	Clorose evoluindo para necrose nas margens e pontas das folhas. Morte dos brotos terminais. Cessa o crescimento apical.
Mg	Clorose internerval das folhas, geralmente seguida de necrose.
S	Clorose uniforme das folhas, as quais adquirem tons verde-limão. Muito comum em folhas jovens.
Fe e/ou Mn	Em casos extremos pode ocorrer branqueamento das folhas.
Zn	A lâmina foliar fica estreita e alongada. Redução da produção de sementes.
B	Folhas menores, mais grossas do que o normal, enquilhadas e quebradiças. Morte dos brotos terminais. Má polinização. Atraso no florescimento.

Fonte: Hoppe. (2004).

A água, além do aspecto fisiológico, tem influência direta no transporte de nutrientes. Lopes (2008) destaca que a disponibilidade de água é afetada pela raiz, radiação solar e umidade relativa do ar, que conjuntamente, afetam a absorção de CO<sub>2</sub> e o crescimento da planta. Umidade em excesso pode ser prejudicial no sentido de favorecer a lixiviação de nutrientes, ocorrência de doenças e menor circulação de oxigênio (WENDLING e GATTO, 2002). O crescimento muito acentuado de mudas pode implicar rápido crescimento foliar e manutenção da umidade na base da planta, criando um ambiente propício ao desenvolvimento de patógenos que afetam plantas jovens.

Outro aspecto importante na produção de mudas florestais é o tipo de substrato, que pode ser definido como um meio adequado para sustentação e retenção das quantidades suficientes e necessárias de água, oxigênio e nutrientes, além de oferecer pH compatível, ausência de elementos químicos em níveis tóxicos e condutividade elétrica adequada (TRIGUEIRO, 2002, PADOVANI, 2006). É desejável que o substrato possua as seguintes características: boa porosidade, capacidade de retenção de umidade, granulometria adequada e pH entre 6,0 a 6,5 (EMBRAPA, 2003).

Rosa Jr. *et al.* (1998) acrescenta que, em função da proporção de materiais minerais e orgânicos utilizados no plantio, as mudas serão afetadas quanto ao suprimento de nutrientes, água disponível e oxigênio. Gonçalves *et al.* (2000), indicam que substratos ideais devem apresentar 70 a 80% de matéria orgânica, sendo o restante complementado por materiais capazes de elevar a macroporosidade. De acordo com Cordell e Filer Jr. (1984), resíduos orgânicos na composição de substratos cumprem a finalidade básica de aumentar a capacidade de reter água e nutrientes para as mudas. Carências em micronutrientes podem ser observadas em substratos predominantemente arenosos, por serem pobres em matéria orgânica, mas vários micronutrientes são fornecidos às mudas em quantidades suficientes pela própria composição química do substrato, água de irrigação, atmosfera e outras fontes naturais (CARNEIRO, 1995).

Segundo Gonçalves *et al.* (2000), além da composição adequada do substrato, o uso de tubetes como meio de suporte otimiza a produção, reduz custos e proporciona melhor qualidade de mudas.

A sobrevivência e o crescimento inicial das florestas estão diretamente relacionados com a qualidade das mudas (FONSECA, 2000). Carneiro (1995) destaca que parâmetros morfológicos das mudas, como altura, diâmetro de colo, maturação da parte aérea e o desenvolvimento do sistema radical, são características de fácil mensuração e bons indicativos da qualidade. Padovani (2006) indica que mudas de boa qualidade devem aparentar vigor e bom estado nutricional e, se produzidas em tubetes, a altura ideal varia entre 20 a 35 cm, com diâmetro do colo mínimo de 2 mm. O caule deve ser único, não ramificado, aparentando dominância apical.

### **3.3 Objetivo**

Verificar o crescimento de mudas de eucalipto em experimentos em casa de vegetação com aplicação de bio sólidos Classes A e B produzidos por caleação e secagem em estufa agrícola

### **3.4. Material e métodos**

#### **3.4.1. Produção de mudas de eucalipto com uso de sementes**

##### **3.4.1.1. Delineamento experimental**

Os experimentos foram conduzidos na casa de sombra do viveiro da Universidade Federal de Viçosa (UFV) e na casa de vegetação do Departamento de Solos da UFV.

O plantio de sementes de *Eucalyptus urophylla* ocorreu na medida em que eram produzidos bio sólidos classes A e B provenientes do Lote 1

(ver capítulo 2) a partir de higienização por caleação ou por secagem em estufa agrícola, tendo ocorrido nas seguintes datas: (i) classe B caleado, 14 de agosto de 2009; (ii) classe B estufa, 14 de agosto de 2009; (iii) classe A caleado, 29 de agosto de 2009; (iv) classe A estufa, 11 de setembro de 2009.

As sementes de eucalipto foram plantadas em tubetes cônicos de polipropileno, com ranhuras internas capacidade de 50 cm<sup>3</sup> e dimensões de 12,5 cm de comprimento, 2,5 cm de diâmetro na abertura superior e 0,8 cm de diâmetro na abertura inferior. Biossólidos classes A e B e substrato Plantmax foram misturados em diferentes proporções, constituindo os vinte tratamentos do experimento (Tabela 3.1).

Cada tratamento foi repetido quatro vezes (em parcelas compostas por 10 mudas), as quais foram dispostas em delineamento inteiramente casualizado. Ao todo foram plantadas 800 mudas (4 tipos / classes de biossólidos x 5 proporções biossólidos / substrato x quatro repetições (em parcelas compostas por 10 mudas).

Embora o delineamento adotado tenha sido do tipo inteiramente casualizado, os tubetes, com as quatro repetições com parcelas de 10 indivíduos em cada, foram colocados lado a lado nos furos das bandejas (Figura 3.1). Isso foi motivado pelo eventual crescimento diferenciado entre os tratamentos. Caso algum tratamento apresentasse baixo crescimento e este se encontrasse próximo à fila de tratamento com crescimento nitidamente maior, poder-se-ia levantar a hipótese do baixo crescimento estar associado à projeção da muda maior sobre a menor (como na Figura 3.1). Outro aspecto que norteou essa decisão foi a possibilidade de existir encontro de raízes de tratamentos diferentes sob a bandeja, podendo comprometer os resultados. Na Figura 3.2, é possível verificar que houve crescimento das raízes ao ponto de atingir a lona (base da bancada), podendo promover o contato entre filas adjacentes; entretanto, com o procedimento adotado, se isso ocorresse, seria dentro de um mesmo tratamento. Os tubetes foram colocados em bandejas com capacidade

para 96 ou 140 tubetes, mas optou-se por colocar dois tratamentos por bandeja, em suas extremidades, ocupando 80 espaços (Figura 3.1).

Tabela 3.1 – Proporção de biossólido e de Plantmax nos vários tratamentos, segundo tipo e classe de lodo.

Lodo cauleado Classe A – Substrato A					
Tratamento	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
Biossólido	100%	75%	50%	25%	0%
Plantmax	0%	25%	50%	75%	100%
Lodo cauleado Classe B – Substrato B					
Tratamento	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
Biossólido	100%	75%	50%	25%	0%
Plantmax	0%	25%	50%	75%	100%
Lodo de estufa agrícola Classe A – Substrato C					
Tratamento	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
Biossólido	100%	75%	50%	25%	0%
Plantmax	0%	25%	50%	75%	100%
Lodo de estufa agrícola Classe B – Substrato D					
Tratamento	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5
Biossólido	100%	75%	50%	25%	0%
Plantmax	0%	25%	50%	75%	100%



Figura 3.1 – Detalhe dos experimentos em casa de vegetação. Cada fila da bandeja representa uma parcela de 10 mudas, com os tratamentos dispostos em lados opostos.



Figura 3.2 - Detalhe dos experimentos em casa de vegetação. Crescimento das raízes de alguns tratamentos.

### 3.4.1.2. Composição dos substratos

A Tabela 3.2 apresenta os resultados de análises químicas realizadas de forma a caracterizar os biossólidos produzidos utilizados na produção de mudas de eucalipto.

O substrato Plantmax, segundo informações no rótulo da embalagem apresenta em sua composição casca de pinus, vermiculita, turfa, corretivo vegetal, carvão vegetal, uréia, superfosfato simples, sulfato de potássio e sulfato ferroso, além das propriedades descritas na Tabela 3.3.

Tabela 3.2 – Caracterização química dos biossólidos produzidos por caleação e secagem em estufa.

Tipo de lodo	pH	N	P	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H + Al
	H <sub>2</sub> O	dag kg <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			
Caleado	8,24	1,55	22,5	379	16,37	2,05	0,0	0,0
Estufa	6,32	3,24	170	661	10,72	2,9	0,0	7,4

Tabela 3.2 – Caracterização química dos biossólidos produzidos por caleação e secagem em estufa (continuação)

Tipo de lodo	SB	(t)	(T)	V	m	M.O	P rem.	Zn	Fe	Mn	Cu
	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			%		dag kg <sup>-1</sup>	mgL <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>			
Caleado	19,39	19,39	19,39	100,0	0,0	35,18	13,2	7,23	29,8	3,2	7,2
Estufa	15,31	15,31	22,71	67,4	0,0	42,22	38,6	-	481,7	36,6	53,1

pH em água, KCl e CaCl<sub>2</sub> - Relação 1:2,5; P - Na - K - Fe - Zn - Mn - Cu – Extrator Mehlich 1; Ca - Mg - Al - Extrator;; KCl - 1mol/L; H + Al – Extrator Acetato de Cálcio 0,5mol/L - pH 7,0; B - Extrator água quente; S - Extrator - Fosfato monocálcico em ácido acético ; Mat. Org. (MO) = C.Org x 1,724 - Walkley-Black; ISNa - Índice de Saturação de Sódio; SB = Soma de Bases Trocáveis; CTC (t) - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; CTC (T) - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; V = Índice de Saturação de Bases; m = Índice de Saturação de Alumínio. P-rem = Fósforo Remanescente

Tabela 3.3 – Propriedades do substrato Plantamax

Parâmetro	Valor
Umidade máxima	50%
pH em H <sub>2</sub> O	5,8
densidade (kg m <sup>-3</sup> )	460
CRA <sup>(1)</sup> / peso seco	150

Fonte: Eucatex – Plantmax Florestal (1): CRA: capacidade de retenção de água.

Embora a porcentagem dos componentes do substrato não seja especificada no rótulo da embalagem, Padovani (2006) cita trabalho de Gonçalves e Poggiani (1996) que encontraram a seguinte composição do Plantmax. (Tabela 3.4)

Tabela 3.4 – Características químicas do substrato Plantmax

Parâmetro	Unidade <sup>(1)</sup>	Valor
Matéria orgânica	% (m/m)	482
Nitrogênio	g de N kg <sup>-1</sup>	6
Relação C/N	-----	44,3
Cálcio	mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	113,28
Fósforo	mg dm <sup>-3</sup>	598,95
Magnésio	mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	576,56
Potássio	g de K kg <sup>-1</sup>	4,4
CTC	mmol kg <sup>-1</sup>	692
pH em água	-----	5,6

(1) Resultados expressos em base seca.

### 3.4.1.3. Condução dos experimentos

As fases de enchimento dos tubetes, semeio e crescimento das mudas até atingirem 3 cm foram realizadas no viveiro da UFV (Figura 3.3), de acordo com os passos descritos a seguir.

(i) O biossólido moído foi umedecido até o ponto de saturação e deixado em repouso sobre lona (à sombra) por 24 horas (ver capítulo 2).

(ii) As misturas de biossólido e Plantmax (V/V), de acordo com as proporções definidas para cada tratamento, foram preparadas em baldes

com capacidade para 10 L. As misturas foram preparadas manualmente com uso de luvas;

(iii) Os tubetes, colocados em prensa, foram preenchidos com as proporções correspondentes a cada tratamento por meio de compactações sucessivas (quatro a dez) em mesa vibradora.

(iv) Em cada tubete, o substrato foi umedecido com regador até gotejar no fundo e, em seguida, foi realizada a semeadura, de acordo com indicações de Hoppe (2004): (a) as sementes (máximo de 10 por tubetes) foram dispostas em depressões de aproximadamente 5 mm, feitas com os dedos na parte superior do substrato; (b) as sementes foram cobertas com camadas finas de vermiculita pura e sobre estas foram aplicadas irrigações leves visando à acomodação das sementes; segundo Gomes e Paiva (2006), essa camada de vermiculita visa proteger as sementes dos raios solares e dos pingos d'água, além de manter a umidade; (c) as bandejas foram cobertas com tela de sombrite para evitar arraste de sementes pelo vento e ação de pássaros, sendo removidas logo após a germinação (entre o sexto e décimo dia após o semeio); (d) as sementes e mudas germinadas foram irrigadas três vezes ao dia.



Figura 3.3 – Casa de sombra do viveiro da Universidade Federal de Viçosa onde foram preparados os tubetes para plantio das sementes de *Eucalyptus urophylla*

Quando as mudas alcançaram aproximadamente 3 cm (em torno de 20 dias após o semeio), foi efetuada a repicagem, selecionando aquelas mais centrais e robustas (TRIGUEIRO e GUERRINI, 2003; HOPPE, 2004)

(Figura 3.4). Após o desbaste, que foi realizado ao final do dia e à sombra, seguido por irrigação, as mudas foram transferidas para a casa de vegetação do Departamento de Solos da UFV (DPS UFV), onde foram dispostas em duas bancadas e passaram a ser irrigadas seis vezes por dia (Figura 3.5).



Figura 3.4 – Tubetes com mudas de eucalipto para seleção e repicagem após atingir 3 cm.



Figura 3.5 - Casa de vegetação do DPS UFV onde foram dispostas as bandejas com as mudas selecionadas de *Eucalyptus urophylla*.

### **Irrigação**

O volume de água foi determinado pelo ponto de gotejamento do substrato no tubete a partir de introdução de água no tubete com auxílio de proveta graduada (10 mL). Esse teste foi realizado com adição de água em 10 tubetes contendo Biossólido Caleado 100%, Biossólido de Estufa 100% e Tubetes com Plantmax 100%, sendo encontrados valores de 3 a 7 mL, seguido de nova adição a cada três horas ao longo do dia (período com sol). De maneira geral, os tubetes com Plantmax foram os que demandaram maior tempo para gotejar, seguidos dos tubetes com biossólido caleado e biossólido de estufa. Tal teste, de acordo com as recomendações da Embrapa (2003), foi realizado apenas como medida norteadora, até porque havia tratamentos com composições diferentes das testadas.

A irrigação na casa de sombra (período de germinação até a fase de repicagem) se deu três vezes ao dia, de forma a alcançar o gotejamento do tubete em cada uma das aplicações, compreendendo o período entre o semeio até vigésimo segundo dia (período das mudas na casa de sombra). Após envio das mudas para a casa de vegetação, a quantidade de água foi ajustada face ao aumento da biomassa. A partir do teste de gotejamento e com base nas recomendações da Embrapa (2003), procedeu-se à irrigação de  $13 \text{ L m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . A irrigação foi efetuada com um sistema formado por quatro aspersores alimentados por uma bomba com *timer* digital e com a programação para ligar seis vezes ao dia (SOUZA-SILVA *et al.*, 2006).

Para estabelecer a programação do *timer* na casa de vegetação foram distribuídos 16 copos coletores em pontos distintos da bancada (Figura 3.6), para verificar se a 'chuva' provocada pelos aspersores era homogênea na área como um todo. A dimensão da área do experimento era de  $2,80 \times 2,70 \text{ m}$ , ou seja,  $7,56 \text{ m}^2$  (bancadas 18 e 21). Foi considerada a área entre as duas bancadas, pois esta também recebia 'chuva' dos aspersores. Cada copo coletor possuía abertura superior com área de  $4,2 \times 4,2 \text{ cm}$  ( $17,64 \text{ cm}^2$  ou  $0,0017 \text{ m}^2$ ). A água em cada um dos 16 copos foi medida com proveta graduada de 10 mL durante três dias, sendo computado o valor médio desconsiderando os pontos que apresentaram pouca 'chuva'.

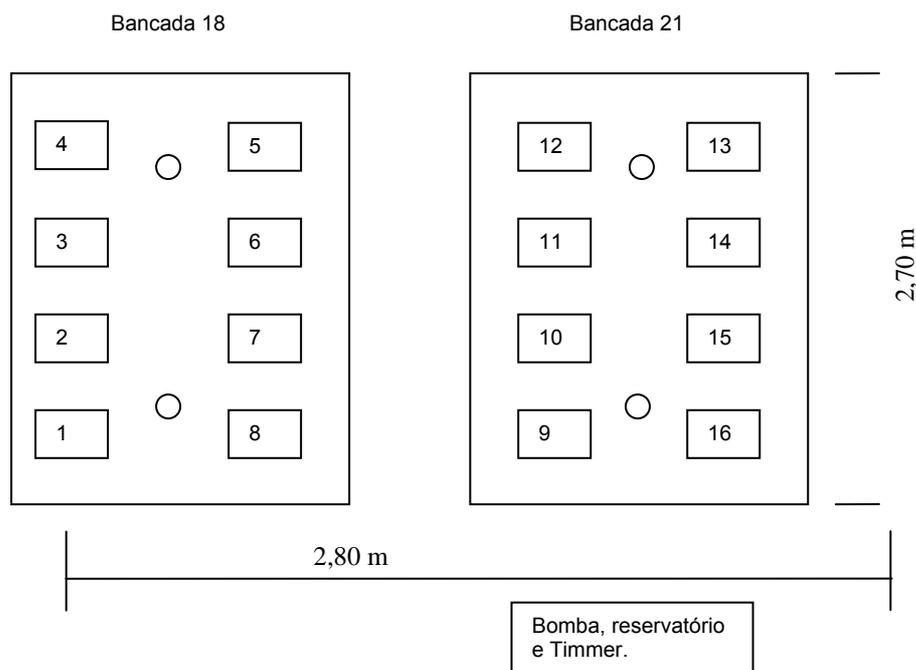


Figura 3.6 - Ilustração esquemática dos testes de irrigação na casa de vegetação, bancadas 18 e 21. Os círculos centrais representam os aspersores.

O *timer* foi programado para ligar e desligar a bomba nos seguintes horários, totalizando  $14 \text{ min d}^{-1}$ : entre 06 h e 06 h 03 min.; entre 08 h e 08 h 02 min.; entre 10 h e 10 h 02 min.; entre 12 h e 12 h 02 min.; entre 15 h e 15 h 02 min.; e entre 17 h e 17 h 03 min. Tendo sido coletados de 22 mL diariamente nos copos, ao longo das seis programações, o volume de água aplicado correspondeu a 3,66 mL por irrigação.

#### 3.4.1.4. Parâmetros de controle

Decorridos 90 dias após o semeio, foram verificados os seguintes parâmetros em todas as plantas de cada parcela do tratamento: (i) sobrevivência; (ii) altura da muda (comprimento da planta medido a partir da base do substrato até a extremidade do ápice da planta com auxílio de régua graduada de 30 cm); (iii) diâmetro do colo (medido a 2 cm da base com auxílio de um paquímetro digital Starret 0-150 ] mm); e (iv) massa de matéria seca final (aérea e raiz). As raízes foram lavadas e colocadas em sacos de papel; a parte aérea também foi acondicionada em sacos de

papel antes de ir à estufa. A secagem do material (raiz e parte aérea) foi realizada em estufa regulada a 75°C por 72 h.

As análises estatísticas (análise de variância, teste de Tukey e testes de regressão) foram realizadas com o programa SAS 2003 (SAS Institute Inc.), com nível de significância de 5%. Em todas as análises estatísticas, foi considerada a parcela (10 mudas) como unidade experimental, exceto para as testemunhas, para as quais foram agrupadas as quatro parcelas devido ao seu pequeno desenvolvimento, o que dificultou a mensuração dos parâmetros

#### **3.4.2. Produção de mudas com uso de clones**

O presente trabalho foi inicialmente planejado para se fazer o plantio com clones, mas em teste prévio as raízes não se desenvolveram e isso resultou na morte de todos os clones logo após a retirada das bandejas e, por isso, como descrito no item anterior, os experimentos foram conduzidos com uso de sementes.

Todavia, paralelamente ao desenvolvimento do experimento com sementes, foi realizado um experimento adicional com clones, adotando-se cuidados extras como a moagem do bio-sólido e o controle do umedecimento antes do enchimento dos tubetes. O plantio dos clones nos tubetes seguiu essencialmente os mesmos procedimentos descritos no item anterior para a produção de mudas com sementes.

Bio-sólidos Classe B (Lote 1, produzido por secagem em estufa) e substrato Plantmax foram misturados em diferentes proporções (100, 75, 50, 25 e 0% de bio-sólidos), constituindo os cinco tratamentos do experimento. Cada tratamento foi repetido duas vezes (em parcelas compostas por 10 mudas), as quais foram dispostas em delineamento inteiramente casualizado.

As miniestacas clonais utilizadas eram híbridos das espécies *E. grandis* e *E. urophylla*, codificados por I-224. Procedeu-se ao estaqueamento logo após a coleta em minijardim clonal. As miniestacas, sem nenhum tipo de tratamento fitohormonal, apresentavam 5,0 cm de comprimento, contendo dois pares de folhas seccionadas ao meio.

Após o plantio, foram observadas etapas em casa de enraizamento (25 dias), casa de sombra (sete dias), casa de rustificação (sete dias) e casa de vegetação, até completar 90 dias. As condições do ambiente na casa de enraizamento eram de temperatura em torno de 30°C e umidade relativa do ar acima de 90%. Na casa de sombra a irrigação era realizada três vezes ao dia. Na casa de vegetação foram seguidos os procedimentos de irrigação adotados no plantio com sementes e descritos no item anterior. Ao final dos 90 dias, foram avaliados os mesmos parâmetros observados para as mudas produzidas com semente: sobrevivência, altura da muda, diâmetro do colo e massa de matéria seca final (aérea e raiz), de acordo com os mesmos procedimentos descritos no item anterior.

As análises estatísticas (ANOVA e teste de Tukey com nível de significância de 5%) foram realizadas com o programa SAS 2003. Em todas as análises estatísticas foi considerada a parcela (10 mudas) como unidade experimental.

### **3.5. Resultados e discussão**

#### **3.5.1. Produção de mudas de *Eucalyptus urophylla* com uso de sementes**

##### **3.5.1.1 Germinação e sobrevivência**

Embora o objetivo desse trabalho seja avaliar as mudas no seu ciclo final, vale ressaltar a porcentagem de germinação das sementes (porcentagem de tubetes).

Na semeadura com lodo classe B caleado, dos 200 tubetes não houve germinação em apenas um deles, correspondendo a 99,75% de germinação. Com lodo classe B de estufa, a germinação foi de 100%. Na semeadura com lodo classe A caleado, dos 200 tubetes não houve germinação em cinco (97,5%). Com lodo classe A de estufa, dos 200 tubetes não houve germinação em 29 (85,5%), a maioria no tratamento com 100% de biossólido (cuja bandeja foi semeada por último). Com adoção de repicagem 20 dias após a semeadura, foram retiradas as mudas excedentes de outros tubetes para recomposição dessas falhas, de forma que todos os tratamentos foram conduzidos à casa de vegetação com uma muda por tubete.

Decorridos 90 dias, a porcentagem de sobrevivência foi sempre superior a 92,5% (Tabela 3.5). Isso indica que nenhum dos tratamentos continha substâncias ou compostos prejudiciais às sementes do eucalipto e que foram capazes de suprir as quantidades adequadas de água e oxigênio para as mesmas.

Tabela 3.5 – Sobrevivência das mudas de *Eucalyptus urophylla* 90 dias após a semeadura em casa de vegetação

<b>Tratamento</b>	<b>Sobrevivência (%)</b>
1.1	95,0
1.2	97,5
1.3	100,0
1.4	100,0
1.5	100,0
2.1	97,5
2.2	100,0
2.3	95,0
2.4	100,0
2.5	100,0
3.1	92,5
3.2	100,0
3.3	97,5
3.4	100,0
3.5	100,0
4.1	97,5
4.2	100,0
4.3	100,0
4.4	97,5
4.5	100,0

### 3.5.1.2. Altura das mudas, diâmetro do colo, matéria seca da parte aérea e matéria seca da raiz.

#### Análise de variância e testes de diferenças de médias

As mudas dos tratamentos que receberam biossólido apresentaram crescimento muito superior às mudas da testemunha (Tabela 3.6). Tal resultado pode ser atribuído às características químicas dos biossólidos, que apresentaram altos teores de nitrogênio e, principalmente, fósforo, nutrientes requeridos em maior quantidade na fase inicial de desenvolvimento das mudas (NOVAIS *et al.*, 1980; NOVAIS *et al.*, 1982).

Tabela 3.6 – Médias de altura, diâmetro do colo e matéria seca (aérea e raiz) <sup>(1)</sup> aos 90 dias de idade, de acordo com o tratamento

Tratamento	Altura (cm)	Diâmetro do colo (mm)	PMSA (g) <sup>(2)</sup>	PMSR (g) <sup>(3)</sup>
1.1	12,21f	0,88h	1,81e	1,12efg
1.2	21,00de	1,32g	4,15d	1,86defg
1.3	24,30cde	1,56def	5,86bc	4,45abc
1.4	21,12de	1,45efg	4,25d	2,65cdef
1.5	5,00g	0,50i	0,75ef	1,38defg
2.1	22,03de	1,43gf	3,92d	4,32abc
2.2	25,87cd	1,65cde	5,84bc	4,68ab
2.3	28,93bc	1,82abc	6,78b	2,60cdef
2.4	28,12bc	1,77bc	6,32bc	2,77bcdef
2.5	5,00g	0,50i	0,28f	0,56g
3.1	19,44e	1,39gf	4,04d	0,98fg
3.2	33,77ab	1,85abc	6,70b	1,32defg
3.3	29,73abc	1,71cd	5,32bcd	1,22efg
3.4	25,92cd	1,55def	5,00cd	1,29defg
3.5	8,00fg	0,50i	1,53ef	0,96fg
4.1	24,52cde	1,79abc	6,27bc	2,16defg
4.2	33,75ab	1,98a	9,19a	4,80a
4.3	34,97a	1,95ab	8,76a	3,15abcd
4.4	21,98de	1,54def	5,02cd	3,00abcde
4.5	5,00g	0,50i	0,73ef	1,03fg

(1) Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (nível de significância de 5%); (2) Peso de matéria seca aérea; (3) Peso de matéria seca raiz.

Tomando por base a altura das mudas, de forma geral, o tratamento testemunha não apresentou mudas com altura superior a 8 cm, diferindo estatisticamente dos resultados dos tratamentos que receberam biossólidos. Entretanto, no Tratamento 1.1 (lodo caledo Classe A, 100%

biossólido) as mudas também apresentaram crescimento limitado, estatisticamente equivalente ao resultado da testemunha do Tratamento 3.5.

Salvo esta exceção, os tratamentos que receberam biossólidos apresentaram mudas de maior porte (alguns indivíduos com até 54 cm). Os tratamentos 3.2 e 3.3 (lodo de estufa agrícola Classe A, com 75 e 50% de biossólidos, respectivamente) e 4.2 e 4.3 (lodo de estufa agrícola Classe B, com 75 e 50% de biossólidos, respectivamente – Figura 3.7) foram os que proporcionaram o maior crescimento das mudas, com resultados estatisticamente semelhantes. Dentre estes, os resultados daqueles com rendimento relativamente pior apresentaram correspondência estatística com alguns dos tratamentos com lodo caleado, como, por exemplo: Tratamento 3.3 com tratamentos 2.2 e 2.3.



Figura 3.7 - Crescimento das mudas dos tratamentos 4.2 (à esquerda) e 4.3 (à direita) divididos pela régua.

Em geral, mas salvo exceções, quanto ao parâmetro altura pode-se observar que: (i) em cada substrato, os piores resultados (alturas inferiores a 25 cm) foram obtidos para as plantas testemunhas (0% biossólidos) e com 100% de biossólidos; (ii) a altura das mudas com lodo de estufa foram superiores àquelas com lodo caleado; (iii) em cada processo de higienização / classe de lodo, os melhores resultados foram obtidos com aplicações intermediárias de biossólidos (50 e 75%).

Pode-se inferir que as alturas superiores a 29 cm obtidas nos tratamentos que receberam 50 e 75% de biossólido de estufa se devam aos nutrientes veiculados pelo biossólido. A superioridade do lodo de estufa em relação ao caleado, quanto aos resultados de altura das mudas, estão, muito provavelmente, associados aos teores de nutrientes mais elevados no lodo de estufa, bem como aos valores de pH bem mais elevados do lodo caleado (ver item 3.4.1.2).

Em geral, esses resultados condizem com os obtidos por Gonçalves e Poggiani (1996), citados por Padovani (2006), que indicaram como adequados substratos obtidos a partir da mistura de um componente orgânico (70 a 80 % da mistura) com um componente secundário usado para elevar a macroporosidade (20 a 30 % da mistura). De forma similar, Trigueiro e Guerrini (2003) encontraram melhor crescimento de mudas com 50% biossólido + 50% substrato Multiplant.

Resultados similares à da altura das mudas foram observados para o diâmetro do colo. Em cada tratamento, os menores diâmetros foram obtidos com as testemunhas (0% biossólidos) e com 100% de biossólidos. Porém, no caso do Substrato D (lodo de estufa agrícola Classe B), os resultados do tratamento com 100% de biossólidos foram estatisticamente equivalentes aos dos tratamentos com 50 e 75% de biossólidos. Em geral, os maiores diâmetros em cada substrato foram também obtidos com aplicações intermediárias de biossólidos (50 e 75%). Entretanto, além da exceção já referida, no Substrato B (Lodo caleado Classe B) o resultado com 25% de biossólidos também foi equivalente aos dos tratamentos com 50 e 75% de biossólidos; e no Substrato A (lodo caleado Classe A), de fato, os tratamentos com 25 e 50% de biossólidos (1.4 e 1.3, respectivamente), foram os que apresentaram os melhores resultados. Considerando todos os tratamentos, os maiores diâmetros do colo (com valores estatisticamente equivalentes) foram observados nos tratamentos 2.3, 3.2, 3.3, 4.1, 4.2 e 4.3 (Tabela 3.6).

O diâmetro do colo é um parâmetro indicador da capacidade de sobrevivência da muda no campo (CARNEIRO, 1995; DANIEL *et al.*, 1997). Embora todos tratamentos testemunhas tenham permitido 100% de sobrevivência, não houve mudas com altura superior a 8 cm e diâmetro maior do que 0,50 mm, sendo este último de difícil mensuração (Figura 3.8). Dessa forma, para facilitar a avaliação dos resultados, as 40 mudas dos tratamentos testemunhas foram agrupadas (inclusive para efeito das análises estatísticas), diferentemente da medição realizada individualmente e agrupada por parcela nos outros tratamentos. O mesmo critério foi adotado para o parâmetro matéria seca.



Figura 3.8 – Mudas de tratamento testemunha (à esquerda na bandeja).

A maior produção de parte aérea foi observada nos tratamentos 4.2 e 4.3, sendo estas estatisticamente equivalentes (lodo de estufa agrícola Classe B, com 75 e 50% de bio-sólidos, respectivamente), seguidos pelos tratamentos 2.3, 3.2, 2.4, 2.2, 1.3 e 3.3 (Tabela 3.6). Mais uma vez, percebe-se que as dosagens intermediárias (50 e 75% de bio-sólido de estufa) foram as que forneceram os melhores resultados.

Quanto ao crescimento das raízes, visualmente e com exceção das testemunhas, todos os tratamentos apresentaram raízes ocupando toda a extensão do tubete, diferenciando-se quanto à espessura e número de raízes adjacentes (raiz fasciculada). As testemunhas, em geral, apresentaram raízes únicas e pouco fasciculadas, o que levou a se fazer a

secagem do tratamento sem discriminar as repetições (parcelas) quando colocadas para secagem em estufa. O crescimento das raízes foi maior (com valores estatisticamente equivalentes), nos tratamentos 4.2, 1.3, 2.2, 2.1, 4.3 e 4.4. Todavia, deve ser registrada a possibilidade de imprecisões ao se pesar as raízes, pois a remoção do bio-sólido remanescente junto às raízes (após a muda ser removida do tubete) se mostrou difícil (mesmo mergulhando em pote com água – Figura 3.9). Assim, é possível que tratamentos que estejam entre os de maior produtividade quanto à altura ou à matéria seca da parte aérea não apresentem correspondência no quesito matéria seca da raiz devido a perda de raízes no processo de remoção (tratamentos 3.2 e 3.3, por exemplo); por outro lado, o tratamento 2.1 pode estar entre os mais produtivos quanto a matéria seca da raiz devido a presença de substrato remanescente nas raízes (Tabela 3.6).



Figura 3.9 - Raiz mergulhada em pote para remoção do substrato (esquerda) e exemplo da necessidade de remoção criteriosa do substrato remanescente para evitar perda de raiz (direita).

Em resumo, e guardadas as devidas exceções, os melhores resultados foram obtidos com misturas com 50 e 75% de bio-sólidos, mais nitidamente para a altura das mudas e o peso de massa seca na parte aérea (Tabela 3.6). A matéria orgânica exerce papel fundamental para que os substratos cumpram a sua finalidade básica que, de acordo com Cordell

e Filer Jr. (1984), atuam aumentando a capacidade de retenção de água e nutrientes para as mudas. Os tratamentos com 100% de biossólidos talvez tenham apresentado resultados inferiores em relação aos com 50 e 75% por promoverem pouca porosidade e, assim, dificultar a aeração. No caso dos tratamentos com 25% de biossólidos, eventuais resultados inferiores podem estar associados à carência de nutrientes.

Os resultados de altura das mudas foram semelhantes quando comparados entre os tratamentos com biossólidos classes A e B submetidos ao mesmo processo de higienização e sob as mesmas proporções de biossólido / Plantmax. Entretanto, diferenças foram observadas para outras variáveis, tais como: diâmetro do colo das mudas (principalmente para o lodo caleado), massa seca da parte aérea e massa seca das raízes (principalmente para o lodo de estufa). Tais diferenças podem ter ocorrido, dentre outros fatores, devido à composição diferenciada dos biossólidos classes A e B, mas isso fica apenas como suposição, pois a análise da composição dos biossólidos ocorreu apenas com o lodo na condição de classe B.

Infere-se que o sistema de irrigação adotado mostrou-se eficiente, não sendo observados sintomas de estresse hídrico. Contudo, no momento da retirada das mudas dos tubetes, alguns apresentavam substrato com baixa umidade, fato provavelmente relacionado ao crescimento foliar e a proximidade entre as mudas, impedindo a chegada da água.

O critério de idade adotado (90 dias) é comumente utilizado no pressuposto de ser suficiente para alcançar o crescimento máximo, por questão de limitação do volume do substrato explorável ( $50 \text{ cm}^3$ ), além de poder induzir a má formação radicular no caso de permanência no viveiro por períodos mais prolongados (MAFIA *et al.*, 2005). No trabalho desse autor, usando dois tipos de clones, a altura média não ultrapassou 40 cm com 120 dias. Gomes e Paiva (2006) relatam que a produção de mudas de eucalipto por via sexuada se dá por volta de 90 dias.

Por fim, registra-se que as mudas não apresentaram sintomas de doenças em nenhum momento do experimento. Contudo, na última semana ocorreu queda de folhas basais (provavelmente pela baixa quantidade de nutrientes) e presença intensa de formigas; além disso, na base de alguns tubetes foi verificado um leve filme de algas, propiciado pelas condições de umidade local.

### **Testes de regressão**

Nas figuras a seguir são apresentados os resultados dos testes de regressão aplicados para cada tratamento. Em geral, os melhores resultados foram obtidos com funções quadráticas, as quais são, portanto, ilustradas nas figuras. Nestas, as linhas azuis mais grossas unem os pontos dos resultados experimentais, enquanto as linhas azuis mais finas representam as funções quadráticas ajustadas, as quais são também mostradas no interior de cada figura.

### **Biossólido caleado Classe A**

No caso do lodo caleado Classe A, as funções quadráticas ajustadas apontam para a otimização da altura e do diâmetro do colo das mudas, da massa seca da parte aérea e da raiz com misturas de 50% de biossólidos e 50% de substrato Plantamax (Figuras 3.10 a 3.13).

Esses resultados de certa forma ratificam os encontrados com os testes de ANOVA e Tukey, os quais, não obstante e por vezes, revelaram equivalência estatística entre os tratamentos com 25, 50 e, ou 75% de biossólidos (Tabela 3.6). O elevado pH do biossólido caleado pode ter comprometido o crescimento das mudas no tratamento com 100% de biossólidos, além do que, nesse caso, a ausência do substrato pode ter comprometido a porosidade e a aeração nos tubetes.

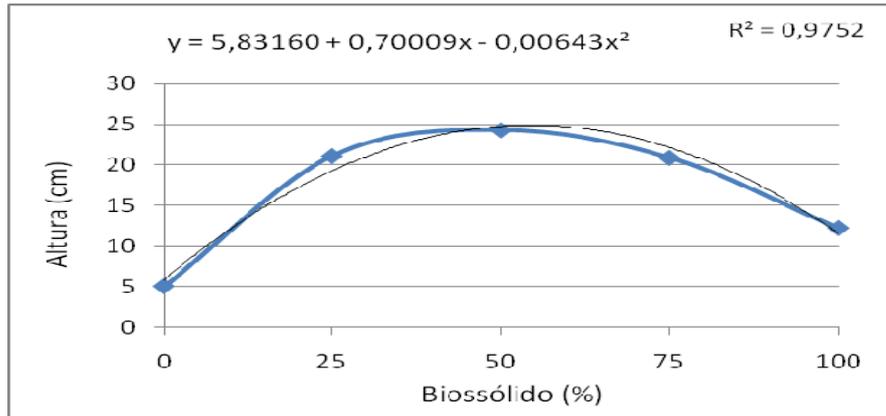


Figura 3.10 – Altura das mudas de eucalipto em função dos níveis de bio-sólido caleado classe A

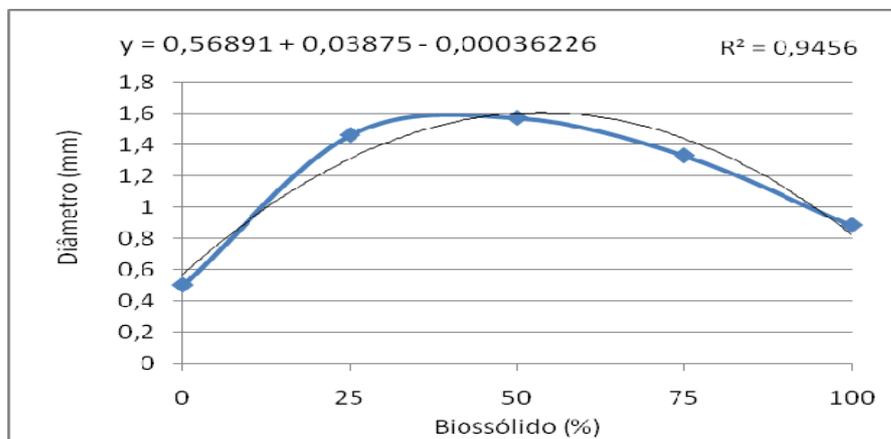


Figura 3.11 – Diâmetro do colo das mudas de eucalipto em função dos níveis de bio-sólido caleado classe A

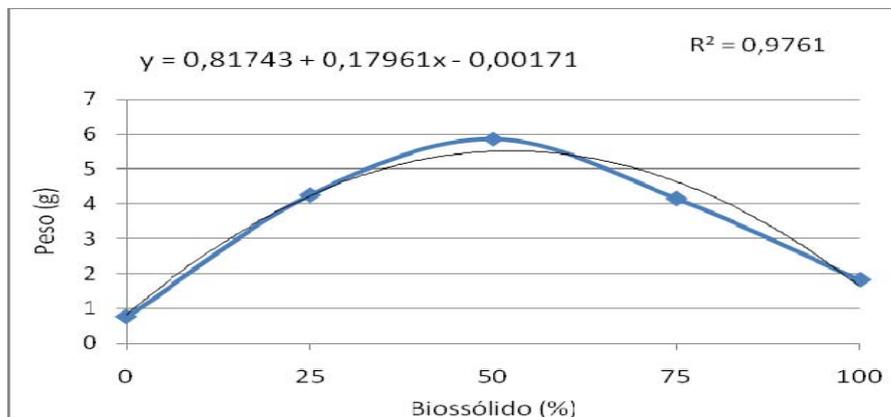


Figura 3.12 – Massa seca da parte aérea das mudas de eucalipto em função dos níveis de bio-sólido caleado classe A

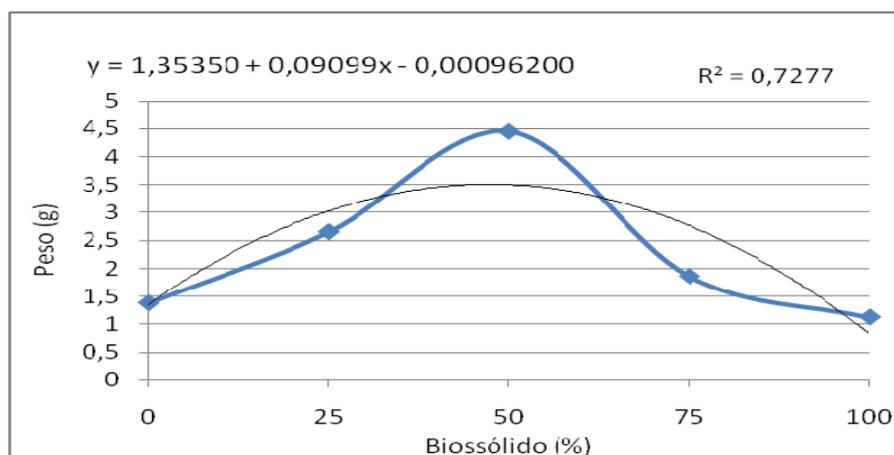


Figura 3.13 – Massa seca das raízes das mudas de eucalipto em função dos níveis de biofósforo calcinado classe A

### **Biofósforo calcinado classe B**

Os resultados obtidos para o biofósforo Classe B foram similares aos do biofósforo Classe A. Em geral, as funções quadráticas ajustadas também apontam para a otimização da altura das mudas, da massa seca da parte aérea e da raiz com misturas de 50% de biofósforos e 50% de substrato Plantamax (Figuras 3.14 a 3.17), muito embora os testes estatísticos anteriores tenham, em geral, revelado equivalência entre os resultados obtidos com 25, 50 e 75% de biofósforos (Tabela 3.6). Os resultados para matéria seca da raiz mostraram-se mais erráticos (Figura 3.17), o que pode estar relacionado com a referida dificuldade para remoção dos substratos da raiz ou perda de raiz durante a remoção do substrato. Também com o biofósforo calcinado Classe B, o elevado pH e, ou porosidade inadequada podem ter comprometido o crescimento das mudas no tratamento com 100% de biofósforos.

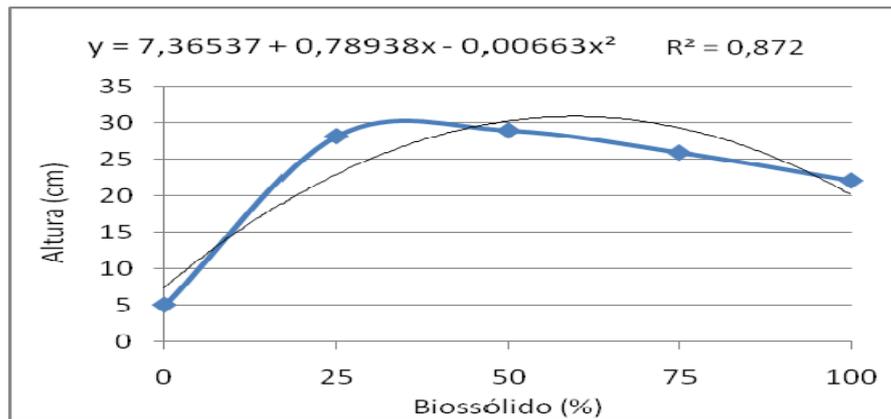


Figura 3.14 – Altura das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido caleado classe B

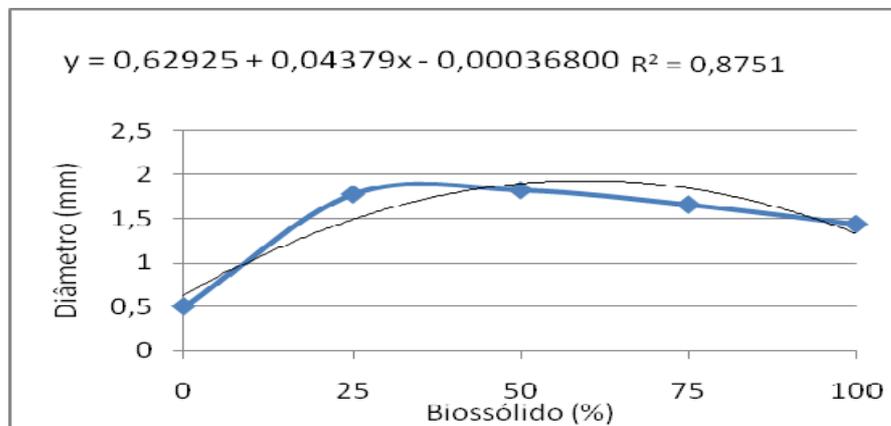


Figura 3.15 – Diâmetro do colo das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido caleado classe B

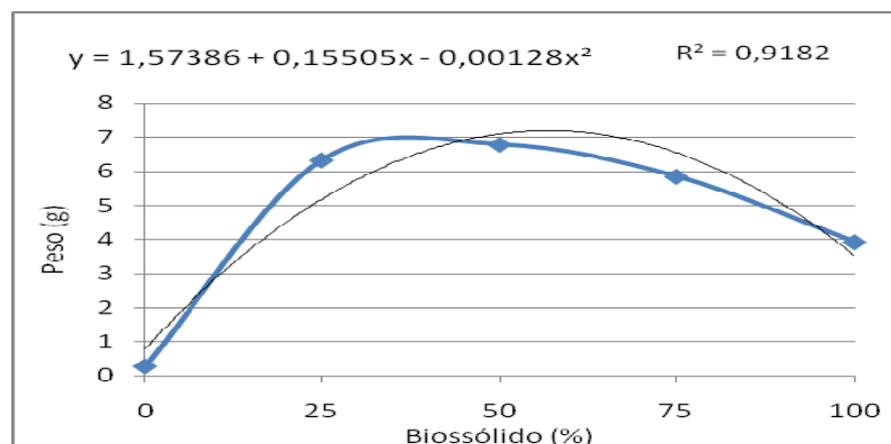


Figura 3.16 – Massa seca da parte aérea das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido caleado classe B

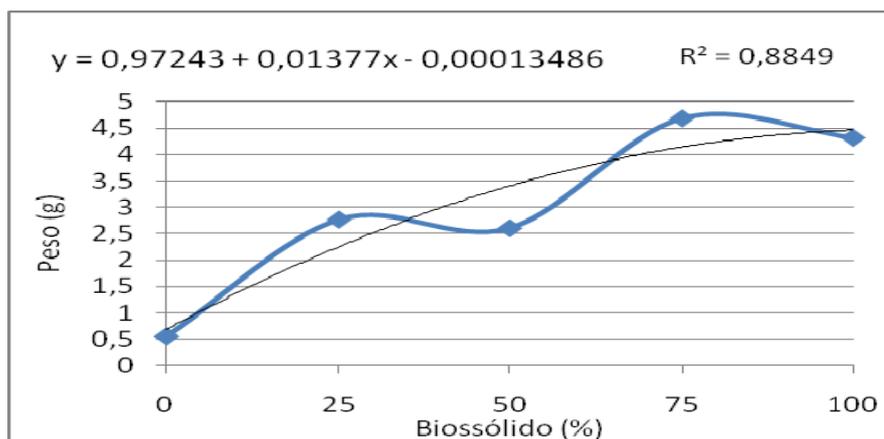


Figura 3.17 – Massa seca das raízes das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido caleado classe B

### **Biossólido de estufa classe A**

De acordo com as funções quadráticas ajustadas aos tratamentos com biossólido classe A de estufa, as proporções de 50% de biossólidos também foram as que otimizariam os resultados da altura e do diâmetro do colo das mudas, da massa seca da parte aérea e da raiz (Figuras 3.18 a 3.21). Entretanto, nesse caso, as diferenças entre os resultados com 50 e 75% de biossólidos são menos destacadas do que no caso do biossólido caleado e isso se vê reforçado pelos resultados dos testes de ANOVA e Tukey (Tabela 3.6).

Nos tratamentos com 25% de biossólidos, a menor disponibilidade de nutrientes pode ter comprometido o desenvolvimento das mudas. No caso dos tratamentos com 100% de biossólidos o aspecto crítico pode ter sido a ausência do substrato e comprometimento da porosidade.

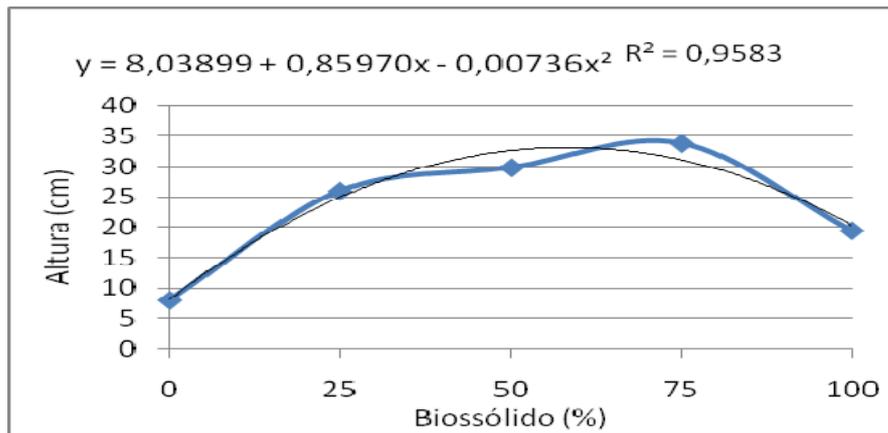


Figura 3.18 – Altura das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido de estufa classe A

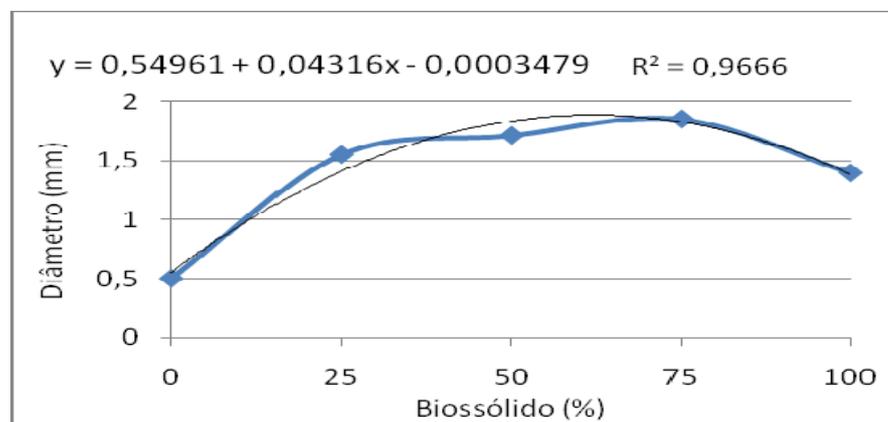


Figura 3.19 – Diâmetro do colo das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido de estufa classe A.

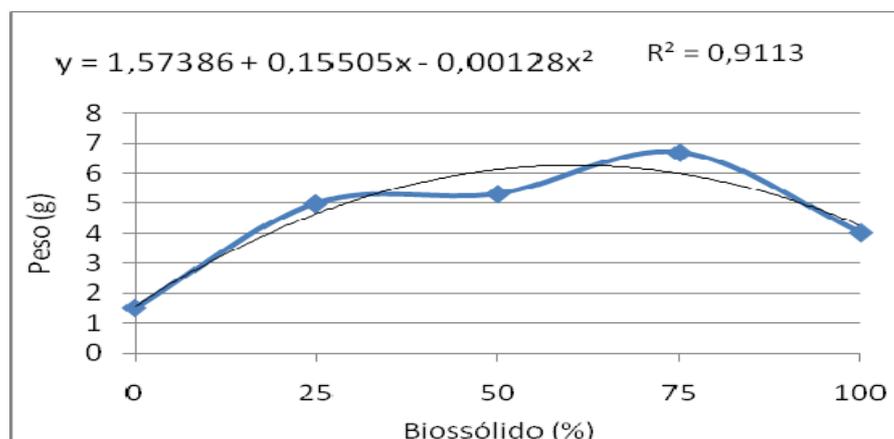


Figura 3.20 – Massa seca da parte aérea das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido de estufa classe A.

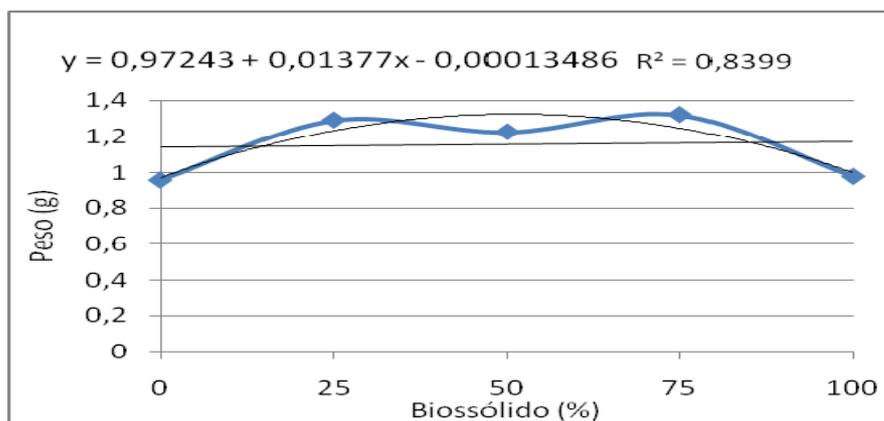


Figura 3.21 – Massa seca das raízes das mudas de eucalipto em função dos níveis de biofósforo de estufa classe A.

### **Biofósforo de estufa classe B**

Assim como no biofósforo de estufa Classe A, de acordo com as funções quadráticas ajustadas aos tratamentos com biofósforo classe B, as proporções de 50% e 75% de biofósforos foram as que otimizariam os resultados de desenvolvimento das mudas. Entretanto, nesse caso, as diferenças entre o que se alcançariam com 50 e 75% de biofósforos são ainda menos nítidas, o que também se vê reforçado pelos testes de ANOVA e Tukey (Tabela 3.6)

Novamente, nos tratamentos com 25% de biofósforos, a menor disponibilidade de nutrientes pode ter comprometido o desenvolvimento das mudas e no o tratamento com 100% de biofósforos pode ter comprometido a porosidade (figuras 3.22 a 3.25).

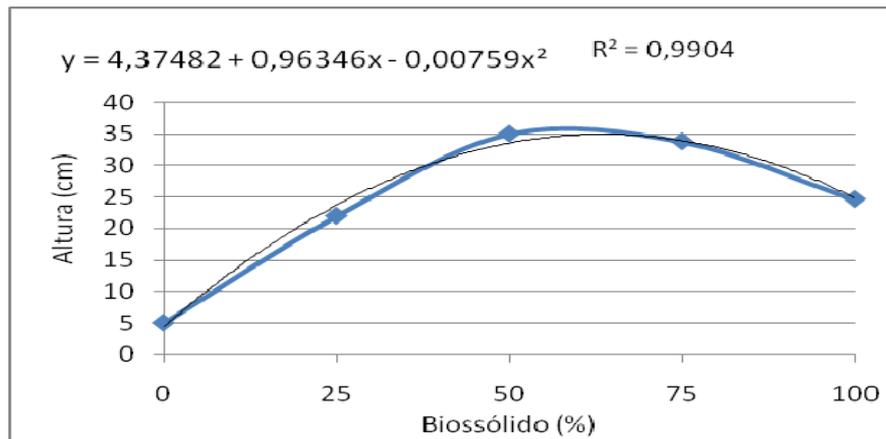


Figura 3.22 – Altura das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido de estufa classe B

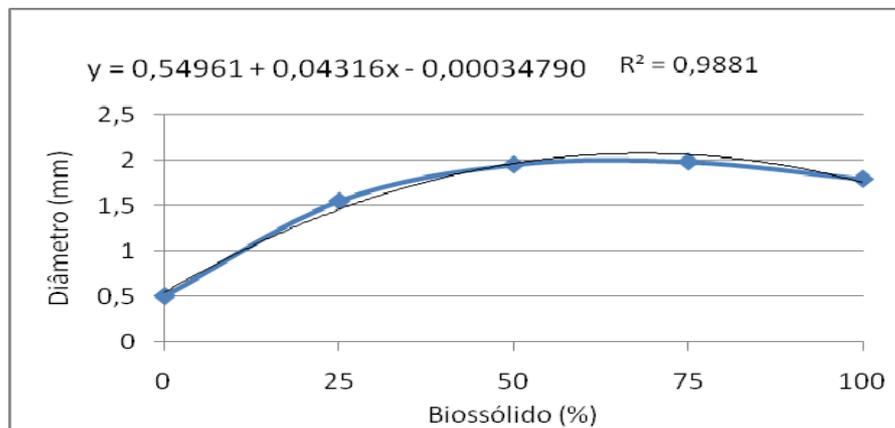


Figura 3.23 – Diâmetro do colo das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido de estufa classe B

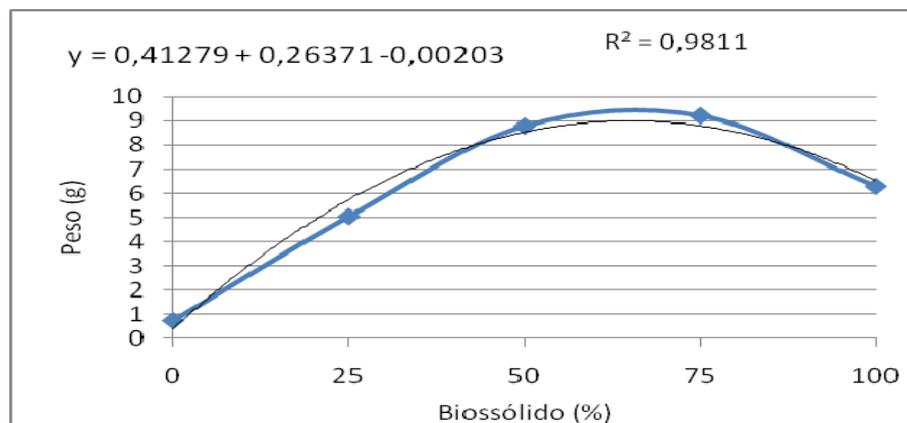


Figura 3.24 – Massa seca da parte aérea das mudas de eucalipto em função dos níveis de biossólido de estufa classe B

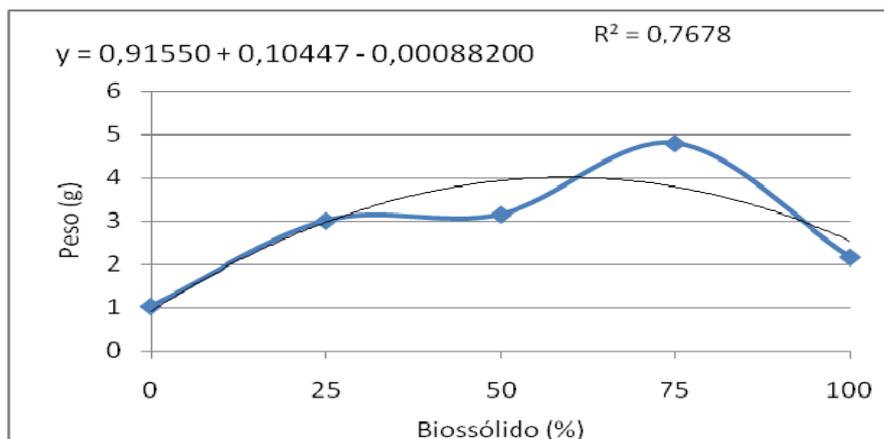


Figura 3.25 – Massa seca das raízes das mudas de eucalipto em função dos níveis de bioestabilizado de estufa classe B

### 3.5.2. Produção de mudas com uso de clones

#### 3.5.2.1 Sobrevivência

A sobrevivência foi acima de 90% (Tabela 3.7) em todos os tratamentos e as mudas não apresentaram sintomas de comprometimento por fitopatógenos.

Tabela 3.7 – Sobrevivência das mudas de *E. grandis* e *E. urophylla*, 90 dias após estaqueamento em casa de vegetação

Tratamento	Sobrevivência (%)
(1) 100% bioestabilizados	90
(2) 75% bioestabilizados + 25% Plantamax	95
(3) 50% bioestabilizados + 50% Plantamax	95
(4) 25% bioestabilizados + 75% Plantamax	100
(5) 100% Plantamax	90

#### 3.5.2.2. Altura das mudas, diâmetro do colo, matéria seca da parte aérea e matéria seca da raiz

Os tratamentos 2 e 3 (com 75 e 50% de bioestabilizados, respectivamente) apresentaram os melhores resultados quanto a altura das mudas, sendo estatisticamente superiores aos dos demais

tratamentos. (Tabela 3.8). Entretanto, nenhum indivíduo entre estes tratamentos ultrapassou 28 cm, muito abaixo dos resultados obtidos com uso de sementes e mesmas proporções bio sólidos / Plantmax.

O Tratamento 1 (100% bio sólidos) talvez tenham apresentado crescimento inferior em relação aos com 50 e 75% por resultar em pouca porosidade e, assim, aeração dificultada. O crescimento elevado nos tratamentos 2 e 3 pode estar associado à boa capacidade de retenção de água da composição destes tratamentos, resultado também verificado por Trigueiro (2002).

Por outro lado, surpreendentemente, os clones do Tratamento 5 (100% Plantmax) apresentaram desenvolvimento muito superior (considerados todos os parâmetros) quando comparado ao uso de sementes com esta mesma proporção.

Tabela 3.8 – Médias de altura, diâmetro do colo e matéria seca (aérea e raiz)<sup>(1)</sup> aos 90 dias de idade, de acordo com o tratamento

Tratamento	Altura (cm)	Diâmetro do colo (mm)	PMSA (g) <sup>(7)</sup>	PMSR (g) <sup>(8)</sup>
1 <sup>(2)</sup>	9,16c	2,00b	2,73b	0,34b
2 <sup>(3)</sup>	22,89a	2,44a	7,72a	3,81a
3 <sup>(4)</sup>	20,26ab	2,25a	7,01a	2,79a
4 <sup>(5)</sup>	19,6b	2,39a	8,20a	2,75a
5 <sup>(6)</sup>	18,6b	2,49a	7,69a	2,70a

(1) Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (nível de significância de 5%); (2) 100% bio sólidos; (3) 75% bio sólidos + 25% Plantamax; (4) 50% bio sólidos + 50% Plantamax; (5) 25% bio sólidos + 75% Plantamax; (6) 100% Plantmax; (7) Peso de matéria seca aérea; (8) Peso de matéria seca raiz.

Os resultados de diâmetro do caule e matéria seca (aérea e raiz) com os tratamentos que receberam 0, 25, 50 e 75% de bio sólidos foram estatisticamente equivalentes e bem superiores ao tratamento com 100% de bio sólidos (Tabela 3.8). Porém, as mudas clonadas apresentaram caule ramificado e pouco retilíneo, e por isso, talvez, inviabilidade para cultivo com vistas à produção florestal.

Embora com altura inferior, o diâmetro do colo foi em geral superior ao obtido com uso de sementes e mesmas proporção proporção biossólidos / Plantmax. O peso de matéria seca (aérea) também foi igual ou superior a vários tratamentos de mudas obtidas por semente, para uma mesma proporção de biossólido. As raízes, por serem mais robustas do que as obtidas a partir do plantio com semente (Figura 3.26), facilitaram a remoção do substrato.



Figuras 3.26: Comparação entre o crescimento e remoção do substrato de raízes do plantio com sementes (à esquerda) e plantio clonal (à direita).

As mudas não apresentaram sintomas de doenças em nenhum momento do experimento, mas nas duas últimas semanas ocorreram folhas com superfície levemente amarelas.

### 3.6. Conclusões

O uso do biossólido produzido na ETE Violeira demonstrou viabilidade agrônômica para produção de mudas de eucalipto.

Em geral, as análises estatísticas revelaram que as misturas com de 50% de biossólidos + 50% de substrato Plantmax e, ou com 75% de

biossólidos + 25% de substrato Plantmax proporcionaram os melhores desenvolvimentos das mudas de eucalipto, tanto no cultivo com sementes quanto com clones.

Em termos gerais, mas com exceções, o biofossólido produzido em estufa promoveu melhores resultados do que o biofossólido calcado, sendo as diferenças mais expressivas foram registradas para a altura das mudas.

Os resultados de altura das mudas foram, em geral, semelhantes quando comparados os tratamentos com biofossólidos classes A e B submetidos ao mesmo processo de higienização e sob as mesmas proporções de biofossólido / Plantmax, não parecendo, nesse caso, ser a 'classe' fator determinante ao rendimento agrônômico nos diferentes tratamentos. Entretanto, diferenças mais nítidas foram observadas para as outras variáveis analisadas (diâmetro do colo das mudas e massa seca da parte aérea e das raízes).

### **3.7. Referências bibliográficas**

ABRAF. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. *Anuário estatístico da ABRAF 2009 – ano base 2008*. Brasília, DF: ABRAF, 2009. 120 p. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF09-BR.pdf>>. Acesso: 30 Out. 2009.

ANDA. ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. *O uso de fertilizantes minerais e o meio ambiente*. Paris, França. Tradução. ANDA, 63 p. 2000. Disponível em: <[http://www.anda.org.br/boletins/fertilizantes\\_meio\\_ambiente.pdf](http://www.anda.org.br/boletins/fertilizantes_meio_ambiente.pdf)>. Acesso: 28 out. 2009.

ANDREOLI, C. V. (Coord.). *Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura*. Curitiba: Sanepar, 98 p. 1999.

ANESI, S. A. O “nó” do eucalipto: a sustentabilidade da silvicultura na metade sul. In: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL: O EUCALIPTO E O CICLO HIDROLÓGICO, I. Taubaté, SP, 2007. *Anais...*Taubaté: IPABHi, p. 351-358. Disponível em: <<http://www.agro.unitau.br/serhidro/doc/pdfs/351-358.pdf>>. Acesso: 11 Nov. 2009.

BARREIROS, R. M.; GONÇALVES, J. L. M.; SANSÍGOLO, C. A.; POGGIANI, F. Modificações na produtividade e nas características físicas e químicas da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação com lodo de esgoto tratado. *Revista Árvore*, v.31, n.1, p.103-111, 2007.

BONNET, B. R. P.; WISNIEWSKI, C.; REISSMANN C. B.; NOGUEIRA, A. C., ANDREOLI C.V.; BARBIERI, S. J. Effects of substrates composed of biosolids on the production of *Eucalyptus viminalis*, *Schinus terebinthifolius* and *Mimosa scabrella* seedlings and on the nutritional status of *Schinus terebinthifolius* seedlings. *Water Science and Technology*, v.46, n. 10, p.239–246, 2002.

CARNEIRO, J. G. *A Produção e controle de qualidade de mudas florestais*. Viçosa: Editora Folha de Viçosa, 451p. 1995.

CIB - Conselho de Informações sobre Biotecnologia. *Guia do eucalipto: oportunidades para o desenvolvimento sustentável*. São Paulo: CIB, 20p. 2008. Disponível em: < [www.cib.org.br](http://www.cib.org.br) >. Acesso: 14 Nov. 2009.

CORDELL, C. E.; FILER JR.; T. H. Integrated nursery pest management. In: *Southern pine nursery handbook*. Atlanta: USDA Forest Service, Southern Region, p.1-17. 1984.

DANIEL, O.; VITORINO, A.C.T.; ALOVISI, A.A.; MAZZOCHIN, L.; TOKURA, A.M.; PINHEIRO, E.R.; SOUZA, E.F. Aplicação de fósforo em mudas de *Acacia mangium WILLD*. *Revista Árvore*, v.21, n.2, p.163-168, 1997.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Embrapa Eucalipto*.2003. Disponível em:<[http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivodoEucalipto/03\\_producao\\_de\\_mudas.htm](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivodoEucalipto/03_producao_de_mudas.htm)>. Acesso: 26 Jul. 2009.

FAUSTINO, R.; KATO, M. T.; FLORÊNCIO, L.; GAVAZZA, S. Lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de *Senna siamea*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, (Suplemento), p.278-282, 2005.

FIA, R.; MATOS, A. T. ; AGUIRRE, C. I. C. Características químicas de solo adubado com doses crescentes de lodo de esgoto caledo. *Engenharia na Agricultura*, v.13, n.4, p. 287-299, 2005.

FIRME, L. P. Produção de madeira e elementos potencialmente tóxicos no sistema solo-eucalipto tratado com lodo de esgoto. 2009. 81f. Tese (Doutorado em Ciências. Área de concentração: Química na agricultura e no ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

FONSECA, E. P. *Padrão de qualidade de mudas de Trema micrantha (L.) Blume., Cedrela fissilis Vell. E Aspidosperma polyneuron Müll. Arg. produzidas sob diferentes períodos de sombreamento.* 2000. 113 p. Jaboticabal: Universidade Estadual Paulista, 2000. 113f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, 2000.

GADIOLI, J. L.; FORTES NETO, P. Rendimento de milho e de feijão preto cultivado em solo acrescido de lodo de esgoto. *Sanare.*, v.21, n.21, p. 53-58, 2004.

GARCIA, G. O.; GONÇALVES, I. Z.; MADALÃO, J. C.; NAZÁRIO, A. A.; REIS, E. F. Crescimento de mudas de eucalipto submetidas à aplicação de biossólidos. *Revista Ciência Agrônômica*, v. 41, n. 1, p. 87-94, 2010.

GOMES, J. M.; PAIVA, H. N. *Viveiros florestais (propagação sexuada).* Viçosa: Editora UFV, 116 p. 2006. (Caderno Didático, 72 – Ciências Agrárias, 3).

GONÇALVES, J. L. M.; POGGIANI, F. Substratos para produção de mudas florestais. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 13, Águas de Lindóia, 1996. *Resumos...* Piracicaba: Sociedade Latino Americana de Ciências o Solo, 1996. (CD- ROM).

GONÇALVES, J. L. M.; SANTARELLI, E. G.; MORAES NETO, S. P.; MANARA, M. P. Produção de mudas de espécies nativas: substrato, nutrição, sombreamento e fertilização. In: GONÇALVES, J. L. M., BENEDETTI, V. *Nutrição e fertilização florestal*. Piracicaba: IPEF, p. 309-350. 2000.

GUEDES, M. C. *Ciclagem de nutrientes após aplicação de lodo de esgoto (biossólido) sobre latossolo cultivado com Eucalyptus grandis*. 2005. 168f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 2005.

HOPPE, J. M (Org.) *Produção de sementes e mudas florestais*, 2ª ed. Santa Maria: [s.n.], 388 p. 2004. (Caderno Didático, 1) Disponível em: <<http://ambienteinteiro.org.br/apostilas/ProducaoDeSementesEMudasFlorestais-Apostila.pdf>>. Acesso: 01 dez. 2009.

LeBLANC, R. J.; MATTHEWS, P.; RICHARD, R. P. *Global atlas of excreta, wastewater sludge and biosolids management. Moving towards the sustainable and welcome uses of a global resource*. Nairobi: UN Habitat, 632p. 2006.

LOPES, J. L. W. *Qualidade de mudas clonais do híbrido de Eucalyptus grandis vs. Eucalyptus urophylla, submetidas a diferentes regimes hídricos*. 2008. 171f. Tese (Doutorado em Agronomia, Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, SP, 2008.

MAFIA, R. G.; ALFENAS, A. C.; SIQUEIRA, L.; FERREIRA, E. M; LEITE. H. G.; CAVALLAZZI, J. R. P. Critério técnico para determinação da idade ótima de mudas de eucalipto para plantio. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.29, n.6, p.947-953, 2005.

MELO, W. J.; TSUTIYA, M. T.; MARQUES, M. O.; SOUZA, A. H. C. B. Nível de fertilidade em solos tratados com biossólido oriundo da estação de tratamento de esgoto de Barueri localizada na região metropolitana de São Paulo e cultivados com milho. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, XXVII, 2000, Porto Alegre. *Anais...* Rio de Janeiro: Abes, 2000 (CD-ROM).

MELO, W. J.; MARQUES, M. O.; MELO, V. P. O uso agrícola do biossólido e as propriedades do solo. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J.; MELO, W.J.; MARQUES, M.O. (ed.). *Biossólidos na agricultura*. 1ª ed. São Paulo: Sabesp, p. 289-364, 2001.

NOVAIS, R. F. O eucalipto, felizmente existe. *Jornal SIF – Sociedade de Investigações Florestais*. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa: SIF, Reedição Junho 2009, n.82, ano 17. 8 p. Disponível em: <[http://www.silviminas.com.br/Publicacao/Arquivos/publicacao\\_179.pdf](http://www.silviminas.com.br/Publicacao/Arquivos/publicacao_179.pdf)>. Acesso: 17 Nov. 2009.

NOVAIS, R. F.; RÊGO, A. K.; GOMES, J. M. Nível crítico de potássio no solo e na planta para o crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e de *Eucalyptus cloëziana* F.Muell. *Revista Árvore*, v.4, n.1, p.14-23, 1980.

NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C., COUTO, C. Níveis críticos de fósforo no solo para o eucalipto. *Revista Árvore*, v.6, n.1, p.29-37, 1982.

PADOVANI, V. C. R. *Composto orgânico de lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de árvores nativas e exóticas*. 2006. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas-SP, 2006.

POGGIANI, F.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade do lodo de esgoto urbano em plantações de eucalipto. *Silvicultura*, v.80, p.48-52, 1999.

POGGIANI, F.; GUEDES, M.C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: I. Reflexo no ciclo dos nutrientes. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed). *Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, p.163-178, 2000.

POGGIANI, F. *Uso de biossólidos produzidos nas estações de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo em plantações florestais*. Piracicaba: FEALQ/SABESP, 2006. 70p. (Relatório Técnico-Científico, 42).

RODIGHERI, H. R. *Florestas como alternativa de aumento de emprego e renda na propriedade rural*. Colombo: Embrapa Florestas, 13 p. 2000. (Circular Técnica, 42).

ROSA JÚNIOR, E.J.; DANIEL, O.; VITORINO, A. C .T.; SANTOS FILHO, V. C. Efeito de diferentes substratos sobre o desenvolvimento de mudas de *Eucalyptus grandis* Hill em tubetes. *Revista de Ciências Agrárias*, v.1, n.2, p.18-22, 1998.

SBS - Sociedade Brasileira de Silvicultura. *Fatos e números do Brasil florestal*.

2007.São Paulo: SBS, 2007, 110 p. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br/FatoseNumerosdoBrasilFlorestal.pdf>>. Acesso: 14 Nov. 2009.

SELIVANOVSKAYA, S, YU.; LATYPOVA, V. Z. Effects of composted sewage sludge on microbial biomass, activity and pine seedlings in nursery forest. *Waste Management*. v.26, p.1253–1258. 2006.

SOUZA-SILVA, A.; ZANETTI R.; CARVALHO G. A., MENDONÇA, L. A. Qualidade de mudas de eucalipto tratadas com extrato pirolenhoso. *Cerne*, v.12, n.1, p.19-26. 2006.

TRIGUEIRO, R. M. *Uso de bio sólido como substrato para produção de mudas de Pinus e Eucalipto*. 2002. 94f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrônômicas) – UNESP, Botucatu, São Paulo, 2002.

TRIGUEIRO, R. M.; GUERRINI, I. A. Uso de bio sólido como substrato para produção de mudas de eucalipto. *Scientia forestalis*, n.64, p. 150-162. 2003.

VAZ, L. M. S. *Crescimento inicial, fertilidade do solo e nutrição de um povoamento de Eucalyptus grandis fertilizado com bio sólido*. 2000. 41f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

VAZ, L. M. S.; GONÇALVES, J. L. M. Uso de bio sólidos em povoamento de eucalipto: efeitos em atributos químicos do solo, no crescimento e na

absorção de nutrientes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, p.747-758, 2002.

WENDLING, I.; GATTO, A. *Substratos, adubação e irrigação na produção de mudas*. Viçosa: Aprenda Fácil Editora, 2002, 166 p.

ZEITOUNI, R. F. *Análise crítica da Norma CETESB P 4.230 – Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas – Critérios para projeto e operação*. 2005. 211f. Dissertação Mestrado – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento de Solos e Recursos Agroambientais, Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2005.

## CAPÍTULO 4

# AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE ASSOCIADO AO USO DE BIOSSÓLIDOS PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE EUCALIPTO

### 4.1. Introdução

Apesar dos benefícios associados ao uso agrícola e florestal de bio sólidos, essa prática ainda é objeto de polêmica e diversos autores têm levantado preocupações sobre impactos potencialmente adversos à saúde humana (CHROSTOWSKI e O'DETTE, 2002; NRC, 2002; BEECHER *et al.*, 2005).

Talvez por isso, como destacado por Bastos (2010a), regulamentações em vigor sobre o uso de bio sólidos tendem a ser rigorosas, em geral incluindo especificações de técnicas de tratamento de lodo, de níveis máximos de contaminantes (químicos e microbiológicos) e de restrições de uso (ver Capítulo 2). No entanto, de acordo com o mesmo autor, nem mesmo as regulamentações mais rigorosas têm sido suficientes para conter polêmicas em torno do uso de bio sólidos, e isso tem em parte a ver com o fato de que muitas vezes esses instrumentos normativos carecem da necessária abordagem de avaliação de risco (GALE, 2005; SIMMONDS, 2005; JENKINS *et al.*, 2007; EISENBERG *et al.*, 2008).

A norma vigente nos Estados Unidos (conhecida como 'Norma 503') (ver Capítulo 2), uma das mais antigas e influentes regulamentações de bio sólidos, tem limites para substâncias químicas estabelecidos com base em metodologia de avaliação de risco, mas os parâmetros microbiológicos não. Na época, a agência ambiental dos EUA (USEPA) entendeu que as informações disponíveis não eram suficientes para a adequada abordagem

de avaliação de risco (EISEMBERG *et al.*, 2008, USEPA, 2003). A regulamentação para patógenos da USEPA é, então, baseada em requisitos de tratamento do lodo e monitoramento, além de restrições de aplicações, com vistas a reduzir a presença de patógenos a concentrações que não provoquem efeitos adversos à saúde. Entretanto, questionamentos têm sido levantados a respeito da real efetividade, por exemplo, das restrições de uso de biossólidos Classe B, uma vez que não existem exigências para que a redução de patógenos seja confirmada a partir de monitoramento de campo (NRC, 2002; FARRELL, 2005). Conforme Bastos (2010a), se por um lado isso poderia justificar a adoção de medidas conservadoras, por outro, poder-se-ia contra-argumentar que as restrições estabelecidas pela Norma 503 são de fato injustificadamente restritivas.

Como visto no Capítulo 2, a regulamentação brasileira é claramente baseada na 'Norma 503', assumindo, entretanto, abordagem ainda mais rigorosa e prevendo a proibição do uso de biossólidos Classe B, "exceto sejam propostos novos critérios ou limites baseados em estudos de avaliação de risco e dados epidemiológicos nacionais, que demonstrem a segurança do uso" dessa classe de biossólidos.

Assim, na opinião de vários autores, passados mais de 15 anos da promulgação da 'Norma 503' e considerando sua influência sobre a regulamentação de biossólidos em diversos países, é chegada a hora de abordar a questão em bases mais consistentes, por exemplo, com recursos de Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico (AQRM) (GALE, 2005; SIMMONDS, 2005; JENKINS *et al.*, 2007; EISENBERG *et al.*, 2008).

Os desenvolvimentos na área de AQRM têm permitido a estimativa de riscos associados à ingestão de microrganismos patogênicos em diferentes cenários de exposição, e essa metodologia tem servido de base para o desenvolvimento de diretrizes e padrões para água potável e para utilização agrícola de águas residuárias, por exemplo, da Organização

Mundial da Saúde (OMS) (WHO, 2006a, 2006b) e da EPA (USEPA, 2006). Mais recentemente, a abordagem da AQRM tem sido estendida ao uso de biossólidos (GALE, 2003; GALE, 2005; EISEMBERG *et al.*, 2008; BASTOS *et al.*, 2009).

Porém, para que os riscos possam ser estimados de forma consistente, são necessárias informações que permitam a formulação de cenários de exposição também consistentes, o que, no caso do uso de biossólidos, pode incluir cenários de risco do consumidor (de produtos agrícolas cultivados com biossólidos) e do trabalhador (risco ocupacional).

No presente capítulo é apresentada uma breve revisão de literatura sobre AQRM (envolvendo aspectos conceituais e aplicados ao uso de biossólidos) e os resultados de experimentos voltados para a estimativa de risco ocupacional associado ao uso de biossólidos para a produção de mudas de eucalipto.

## **4.2. Revisão de literatura**

### **4.2.1. Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico – aspectos conceituais**

Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico (AQRM) constitui uma ferramenta que possibilita a estimativa da probabilidade de infecção sob uma dada circunstância de exposição ambiental. Em resumo, modelos de AQRM apresentam dois componentes: um modelo de exposição, por meio do qual se estima a ingestão de patógenos, e um modelo probabilístico de estimativa de efeito (dose-resposta) à exposição de um determinado patógeno (HAAS *et al.*, 1999). Em outras palavras, conhecida a concentração de organismos patogênicos em uma dada matriz (por exemplo, biossólidos ou alimentos cultivados com biossólidos) e estimada a ingestão de patógenos a cada evento de exposição (por exemplo, por meio do consumo de alimentos ou da ingestão involuntária de partículas de

solo ou de bio-sólidos), se pode estimar o risco de infecção em base populacional e temporal mediante o emprego de modelos probabilísticos, os quais levam em consideração informações de dose-resposta de exposição a um determinado patógeno.

Resultados de estudos experimentais indicaram dois modelos matemáticos (modelo beta-Poisson e modelo exponencial, equações 1 e 2) para expressar a probabilidade de infecção resultante da ingestão de um número médio conhecido de organismos (HAAS, *et al.*, 1999). Ambos estimam o risco de infecção associado a uma única exposição, sendo que o modelo  $\beta$ -Poisson tem sido utilizado para a estimativa de riscos de infecção por bactérias e vírus e o modelo exponencial para protozoários.

$$P_I(d) = 1 - \left[ \left( 1 + \frac{d}{DI_{50}} \right)^{-\alpha} \right] \quad (1)$$

$$P_I(d) = 1 - \exp \left( -r \cdot d \right) \quad (2)$$

onde:

$P_I(d)$  = probabilidade de infecção para uma única exposição (por exemplo, risco diário);

$d$  = número de organismos ingeridos por exposição (dose);

$DI_{50}$  = dose infectante média

$\alpha$  e  $r$  = parâmetros característicos da interação agente-hospedeiro (HAAS *et al.*, 1999).

A partir das equações 1 e 2 se pode estimar o risco para períodos de tempo maiores (por exemplo, anual) ou seja, para múltiplas exposições à mesma dose:

$$P_{I(A)}(d) = 1 - [1 - P_I(d)]^n \quad (3)$$

onde:

$P_{I(A)}$  = probabilidade anual de infecção decorrente de  $n$  exposições à mesma dose ( $d$ )

n = número de exposições por ano

Mais recentemente, e como referido adiante, Navarro *et al.* (2009), propuseram o uso do modelo Beta-Poisson também para ovos de helmintos, mas Bastos (2010a) recomenda cautela no emprego do modelo proposto uma vez que haveria controvérsias em relação aos pressupostos utilizados no desenvolvimento do mesmo.

Os modelos de AQRM podem também ser utilizados de forma inversa, ou seja, definido um nível de risco tido como tolerável, se pode calcular o nível máximo de patógenos presentes no biossólido a ser utilizado e, por conseguinte, o grau de tratamento requerido para o lodo. Portanto, uma decisão fundamental e inerente ao processo de AQRM é a definição do que seja risco tolerável (BASTOS *et al.*, 2009). Hunter e Fewtrell (2001) sugerem que o risco é aceitável quando: (i) está abaixo de um limite definido arbitrariamente; (ii) está abaixo de um nível já tolerado; (iii) está abaixo de uma fração do total da carga de doença na comunidade; (iv) o custo de redução do risco excederia o valor economizado; (v) o custo de oportunidade da prevenção do risco seria mais bem gasto em outras ações de promoção da saúde pública; (vi) os profissionais de saúde dizem que é aceitável e (viii) o público em geral diz que é aceitável (ou não diz que é inaceitável).

Nos EUA é admitido risco anual de infecção de  $10^{-4}$  (um caso anual de infecção dentre 10.000 pessoas) para os diversos organismos patogênicos transmissíveis via abastecimento de água para consumo humano, considerando um padrão de consumo de  $2 \text{ L d}^{-1}$  (HAAS *et al.*, 1999). Nas diretrizes da OMS para a qualidade da água para consumo humano e para a utilização agrícola de esgotos sanitários (WHO, 2006a; WHO, 2006b), os riscos toleráveis anuais admitidos são:  $7,7 \times 10^{-4}$  para vírus (rotavírus),  $3,1 \times 10^{-4}$ ; para *Campylobacter* (tomada como referência para risco de infecção bacteriana) e  $2,2 \times 10^{-3}$  para *Cryptosporidium* (tomado como referência para risco de infecção por protozoários)

#### 4.2.2. Estudos de AQRM aplicados ao uso de biossólidos

A literatura registra vários estudos de aplicação de modelos de AQRM para estimativa de riscos associados ao consumo de água e ao uso de esgotos sanitários para irrigação (por exemplo, HAMILTON *et al.*, 2006; AMOAH *et al.*, 2007; MARA *et al.*, 2007; BASTOS *et al.*, 2008). Trabalhos aplicados ao uso de biossólidos são, entretanto, mais escassos. A seguir são resumidos alguns desses relatos de literatura, com destaque para aqueles dedicados à estimativa de risco ocupacional.

Gerba *et al.* (2002), utilizaram modelos determinísticos para estimar riscos de infecção por vírus entéricos (rotavírus e Echovirus-12) após aplicação de biossólido classe B (segundo a norma dos EUA) e ingestão de partículas de biossólidos ou de solos com incorporação de biossólidos. O modelo de exposição assumiu: (i) concentração de vírus no biossólido de 5,18 NMP / 4 g (média aritmética de dados sobre a ocorrência de enterovírus em lodo tratado por digestão anaeróbica mesofílica); (ii) taxa de aplicação de biossólidos de 10 t ha<sup>-1</sup>; (iii) ingestão de 50 e 480 mg d<sup>-1</sup> de biossólidos ou solo + biossólidos; (iv) jornada de trabalho de oito horas por dia e exposição por um e dez dias e (v) não ocorrência de inativação do vírus após a aplicação no solo. O modelo beta-Poisson foi utilizado como modelo dose-resposta, adotando valores de  $\alpha$  e  $\beta$  sugeridos por Haas *et al.* (1999). As estimativas de risco para o cenário de exposição direta aos biossólidos (ou seja, assumindo que biossólido é espalhado na superfície do solo) foram, em geral, elevadas: 10<sup>-1</sup>-10<sup>-2</sup> para rotavírus e 10<sup>-2</sup>-10<sup>-4</sup> para Echovirus-12. No entanto, se o biossólido fosse incorporado ao solo, as estimativas de risco seriam bem menores: 10<sup>-3</sup>-10<sup>-5</sup> para rotavírus e 10<sup>-5</sup>-10<sup>-7</sup> para Echovirus-12.

Gerba *et al.* (2008) realizaram estudo de avaliação de risco de infecção por *Salmonella* através do contato com biossólidos Classe B. O modelo determinístico utilizado considerou o valor médio de concentração de *Salmonella* de um banco de dados de 14 amostras coletadas na estação de tratamento de esgotos de Ina Road em Tucson, Arizona (10<sup>5</sup>

NMP g<sup>-1</sup>). Foi assumido que a exposição resultaria de atividades no local de aplicação do bioestabilizado durante um período de 8 horas. A ingestão de partículas de solo ocorreria via contaminação das mãos, seguida pela transferência para a boca. Como no trabalho anterior de Gerba *et al.* (2002), 50 e 480 mg.d<sup>-1</sup> foram utilizados como valores mínimo e máximo para taxa de ingestão de partículas de solo. Por fim, foi assumida taxa de aplicação de bioestabilizados de 22,454 kg.ha<sup>-1</sup> e que ocorreria diluição de 100 vezes após a incorporação do bioestabilizado no solo. Foi considerado que não haveria decaimento de *Salmonella* após a aplicação no solo. Como modelo dose-resposta foi utilizado o modelo Beta-Poisson. Os resultados sugeriram que se bioestabilizados Classe B fossem dispostos na superfície do solo, e considerando a ingestão de 480 mg de bioestabilizado por dia, o risco de infecção por *Salmonella* (5,4 x10<sup>-3</sup>) excederia, pouco entretanto, as recomendações da USEPA de risco anual máximo de infecção de 10<sup>-4</sup> pppa. Entretanto, se os bioestabilizados fossem incorporados no solo, isso reduziria os riscos a 5,5x10<sup>-5</sup>, mesmo considerando a taxa mais elevada de ingestão de solo+ bioestabilizados.

Navarro *et al.* (2009), utilizando dados epidemiológicos de exposição à irrigação com esgotos sanitários no Vale do Mezquital (México), testaram os dois modelos descritos nas equações 1 e 2 e concluíram que o modelo Beta-Poisson foi o que melhor se ajustou aos dados de infectividade de *Ascaris lumbricoides*. De posse desse modelo, os autores aplicaram AQRM para a estimativa de risco associada ao uso de bioestabilizados no cultivo de cenoura, concluindo que o padrão da norma dos EUA (< 0,25 ovos /g ST) soa muito restritivo.

Bastos *et al.* (2009) aplicaram AQRM a cenários de uso de bioestabilizados Classe A e B para cultivo de alface e cenoura e estimativas de risco ao consumidor e ao trabalhador. Para este último cenário foi considerada a ingestão involuntária de 10 mg por dia de partículas de bioestabilizados ou de solos + bioestabilizados, durante 120 dias. Para bioestabilizados Classe B (10<sup>6</sup> CTer/g ST), foram assumidos os seguintes dados para a

definição da dose de patógenos ingerida por evento de exposição: 10 salmonelas.g ST<sup>-1</sup>; 10 rotavírus. g ST<sup>-1</sup>; 10 ovos de helmintos.g ST<sup>-1</sup>; 0,5 cisto de *Giardia*.g ST<sup>-1</sup> e 5 oocistos de *Cryptosporidium*.g ST<sup>-1</sup>. Para biossólidos Classe A (10<sup>3</sup> CTer g ST<sup>-1</sup>), foram assumidos os seguintes valores: 0,1 salmonela. g ST<sup>-1</sup>; 0,25 rotavírus. g ST<sup>-1</sup>; 0,25 ovos de helmintos g ST<sup>-1</sup>; 0,1 cisto de *Giardia*.g ST<sup>-1</sup>e 0,5 oocistos de *Cryptosporidium*.g ST<sup>-1</sup>. Para o cálculo do risco decorrente de uma única exposição foram utilizados os modelos  $\beta$ -Poisson (samonela, rotavírus e helmintos) e exponencial (protozoários).

De acordo com os cenários de exposição construídos, os riscos mais elevados (associados a bactérias, vírus e protozoários), e acima dos níveis toleráveis assumidos pela OMS para a irrigação com esgotos sanitários, seriam mais frequentemente associados aos vírus, com destaque para as seguintes situações: (i) risco do consumidor – aplicação de lodo Classes A e B para o cultivo de cenoura; (ii) risco do trabalhador – ingestão acidental de solo com aplicação de lodo Classe B e ingestão involuntária de biossólidos pelo manuseio de lodo Classes A e B. Em relação à proteção do trabalhador, os riscos estimados foram particularmente elevados quando considerado o cenário mais desfavorável de manuseio direto de biossólidos Classe B. Por sua vez, o risco associado à ingestão acidental de solo com biossólidos incorporados pareceu ser de menor relevância. Considerando os helmintos, em ambos cenários (risco do consumidor e trabalhador), riscos elevados foram registrados apenas para a simulação de uso de lodo Classe B. Na opinião dos autores há, portanto, sugestões de que o padrão Classe A da regulamentação brasileira (< 0,25 ovo g ST<sup>-1</sup>) seja muito conservador e, por outro lado, que o padrão Classe B (< 10 ovos g ST<sup>-1</sup>) seja permissivo demais.

De alguns dos estudos acima citados, se nota que uma informação fundamental para a construção de cenários de exposição em modelos de AQRM é a taxa de ingestão de partículas de biossólidos. Em revisão sobre o tema, Bastos (2010b) cita que há várias e destoantes informações na literatura e destaca o trabalho de Finley *et al.* (1994), que propõe a

seguinte distribuição de frequência para dados de ingestão de partículas de solo por crianças: 21 mg d<sup>-1</sup> (média), 16 mg d<sup>-1</sup> (mediana), 67 mg d<sup>-1</sup> (percentil 90%), 110 mg d<sup>-1</sup> (percentil 95%). Entretanto, como ponderado pelos referido autores esses dados apresentam algumas limitações, por exemplo, o fato de que a distribuição sugerida tem como base um estudo com 64 crianças de 1 a 4 anos em atividades escolares, com dados coletados em período relativamente curto (duas semanas) e em clima temperado. Com relação aos adultos, os citados autores sugerem que as informações disponíveis são menos consistentes, mas destacam indicações, conservadoras, em torno de 50 a 65 mg d<sup>-1</sup>. Bastos (2010b) chama atenção para o fato de que não há informações específicas sobre ingestão de solo/biossólido em atividades de trabalho na agricultura e cita sugestão de Sheppard (1995) de 20 mg d<sup>-1</sup> em atividades de jardinagem.

Por fim, cabe registrar que a grande maioria dos trabalhos sobre AQRM aplicada ao uso de biossólidos utiliza modelos determinísticos, isto é, aqueles em que as variáveis de entrada são representadas por valores únicos e que, por conseguinte, não levam em conta incertezas e variabilidade em torno dessas variáveis. Isso é considerado em modelos estocásticos, em que as variáveis de entrada são computadas em faixas de valores conforme determinada distribuição de probabilidades, dentre as quais se procede à amostragem aleatória, por exemplo, por meio de simulação de Monte Carlo. Dessa forma, os resultados, no caso as estimativas de risco, são também expressos em termos de distribuição de probabilidades (HAMILTON e STAGNITTI, 2008).

### **4.3. Objetivos**

Estimar riscos ocupacionais associados ao uso de biossólidos para a produção de mudas de eucalipto em viveiro com aplicação da metodologia de Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico.

## 4.4. Material e métodos

### 4.4.1. Identificação do perigo

Para efeito deste trabalho, foram considerados os patógenos helmintos (ovos) e *E.coli* O157, os quais foram monitorados ao longo dos experimentos (com as devidas ressalvas em relação à *E.coli*, haja vista que nem todas as cepas são patogênicas) e para os quais existem informações disponíveis sobre dose-reposta (também, com as devidas ressalvas destacadas no item 4.2.1 sobre os helmintos)

A *Escherichia coli* é uma bactéria habitante do trato intestinal de humanos e animais homeotérmicos e, em geral, não patogênica. Entretanto, algumas poucas cepas podem apresentar patogenicidade, como a *E.coli* O:157, uma cepa entero-hemorrágica, habitante ocasional, não patogênica, do trato intestinal de animais, mas agente da colite hemorrágica humana. Os testes usuais para isolamento da *E.coli* não detectam cepas entero-hemorrágicas, mas há sugestões que essas cepas apresentam resistência ambiental similar à das cepas não patogênicas (WHO, 2006a). Em resumo, a abordagem aqui assumida é altamente conservadora, pois os dados efetivamente disponíveis são de *E.coli* (genericamente) e não especificamente de *E.coli* O:157, as quais, por pressuposto, se presentes nas amostras analisadas, ocorreriam em números bem mais baixos.

A contaminação por *E. coli* entero-hemorrágica se dá principalmente por ingestão de alimentos ou água contaminados (SCHAECHTER *et al.*, 2002). Já a infecção por helmintos nematóides é adquirida pela ingestão de ovos (*Ascaris*, *Trichuris*) ou pela penetração direta na pele da larva do solo (Ancilostomídeo). A infecção normalmente é assintomática, a não ser que o contágio se dê por altas doses, o que desencadeia, dentre outros, obstrução intestinal. Essas parasitoses são cosmopolitas e a prevalência atinge elevado contingente populacional em todo o mundo (SCHAECHTER *et al.*, 2002).

#### 4.4.2. Modelo de exposição

O grupo de risco considerado seria de trabalhadores envolvidos na produção de mudas de eucalipto em viveiro. A exposição se daria pela ingestão involuntária de partículas de biossólidos via mecanismo mão-boca, possível de ocorrer no desenvolvimento das atividades citadas a seguir durante as fases de plantio, acompanhamento do crescimento e de transposição das mudas para o solo.

- Disposição do biossólido sobre lona para ser umedecido e misturado com as mãos
- Enchimento dos tubetes após distribuir manualmente o lodo sobre a grade da mesa vibradora (compactação do substrato no tubete).
- Semeio, durante o qual se faz com os dedos uma depressão na parte superior do substrato no tubete para receber as sementes.
- Após a germinação, novo contato para seleção das mudas em cada tubete.
- Acompanhamento do desenvolvimento das mudas em casa de vegetação. Embora não ocorra contato intenso com o substrato ao longo do desenvolvimento da planta na casa de vegetação, exceto quanto a muda atinge o ponto de transferência para o solo, particularmente, neste trabalho, o contato se dava quando da coleta do substrato para análise de matéria seca.

Em abordagem conservadora, foi considerado que a exposição se deu em atividades constantes durante 90 dias (agosto a janeiro, de acordo com a rotina de produção do viveiro da UFV), com jornada de trabalho de oito horas diárias e taxa de ingestão de biossólidos de  $20 \text{ mg d}^{-1}$ . Esse cenário pode ser considerado conservador, pois não se levou em conta o fato de que a ingestão de somente biossólidos se dá apenas na fase inicial de preparo dos tubetes, e que após isso a ingestão seria de biossólidos

misturados ao substrato Plantmax e que os vários tratamentos envolveram diferentes proporções de biossólidos / Plantmax.

Para efeito de estimativa de riscos, foram considerados os tratamentos com 100% de biossólidos (sem Plantmax) e aqueles com maior rendimento agrônômico. Esse último critério foi baseado em análise visual do crescimento das mudas, visto que no momento das análises microbiológicas para aplicação dos modelos de AQRM ainda não se tinham disponíveis as análises estatísticas dos resultados agrônômicos. Cabe ressaltar que se adotou como critério de produtividade a altura das mudas em detrimento do peso de matéria seca, pelo fato de que a execução dessa última análise demanda três dias e isso poderia comprometer a fidelidade dos resultados das análises microbiológicas no exato momento da remoção do substrato do tubete.

#### **4.4.3. Estimativa das doses**

As estimativas das doses de patógenos ingeridas via ingestão de biossólidos foram realizadas com base no monitoramento de *E.coli* e ovos viáveis de helmintos em dois momentos: no plantio (chamado de momento 'inicial') e na retirada das mudas dos tubetes ('final', 90 dias depois do plantio). Para a estimativa da dose 'inicial' de *E. coli* foram considerados os resultados de análises realizadas em cada tratamento 24-48 horas após o preenchimento dos tubetes e umedecimento das misturas biossólido e Plantmax. Quanto aos ovos de helmintos, as respectivas doses iniciais foram estimadas com base nos resultados de análises realizadas no biossólido antes do preparo dos tubetes, ajustando-se as contagens de ovos de acordo com as proporções das misturas biossólido e Plantmax. Por exemplo, se a amostra do biossólido continha 1 ovo por g de ST, no tratamento com 50% de biossólido ter-se-á, 0,5 ovos por g de ST. Cabe, entretanto, reconhecer que a distribuição do patógeno na massa de lodo não se dá de forma homogênea.

A opção pelo cômputo da dose inicial de *E. coli* com base nos resultados das análises após o preenchimento dos tubetes se deu pelo fato de que o umedecimento do substrato poderia, em tese, provocar crescimento bacteriano. Isso de fato foi observado, com elevação de até três unidades logarítmicas em relação ao biossólido tratado (no caso do lodo em estufa). Em relação aos ovos de helmintos, como acima referido, a referência para a estimativa das doses foi mesmo o resultado obtido no lodo tratado, pois nesse caso não é de se esperar crescimento de contagens (a reprodução de helminto é sexuada).

As duas doses ('inicial' e 'final') foram, entretanto, consideradas no modelo de AQRM para o cômputo de exposição continuada (de acordo com o modelo de exposição descrito no item anterior), ou seja, foram considerados dois cenários de exposição continuada a duas doses distintas, embora estas, de fato, ocorreriam em momentos distintos.

Assim, para efeito de cômputo das doses, as concentrações 'iniciais' e 'finais' encontradas de *E.coli* e de ovos viáveis de helmintos (expressas por gama de ST) foram ajustadas para o volume ingerido de biossólidos (20 mg). Por exemplo, para biossólido com 1000 *E. coli* g<sup>-1</sup>, a dose seria de 20 *E. coli* em 20 mg de biossólidos; de forma análoga, com 1,2 ovos viáveis de helmintos por grama de ST, a dose em 20 mg de biossólidos seria de 0,024 ovos.

#### **4.4.4. Modelo dose-resposta**

Os riscos de infecção devidos a uma exposição foram estimados com base no modelo  $\beta$ -Poisson (Equação 1). Para *E.coli* O:157 foram utilizados os seguintes parâmetros:  $\alpha = 0,1778$ ;  $DI_{50} = 8,6 \times 10^7$  (HASS *et al.*, 1999). Para helmintos foram utilizados os parâmetros sugeridos por Navarro *et al.* (2009):  $\alpha = 0,104$ ;  $DI_{50} = 859$

Para a estimativa de riscos decorrentes de múltiplas exposições, de acordo com o modelo de exposição descrito no item anterior, foi utilizada a Equação 3.

#### **4.4.5. Determinação do teor de sólidos e da qualidade microbiológica da água de lavagem de luvas utilizadas no manuseio do biossólido.**

A fim de subsidiar discussão sobre o próprio cenário de exposição assumido no modelo de AQRM, procedeu-se à investigação do teor de sólidos e da qualidade microbiológica da água de lavagem das luvas utilizadas no manuseio do biossólido, tanto nas atividades de plantio quanto na retirada das mudas dos tubetes ao final dos experimentos.

Após o manuseio dos biossólidos com a utilização de luvas descartáveis de laboratório, estas eram submetidas a três lavagens consecutivas (sempre antecedidas de manipulação de biossólidos) com água coletada em torneira do laboratório. Na primeira lavagem eram utilizados 100 mL de água, os quais eram coletados em frasco estéril para análise de coliformes totais e de *E. coli*. Na segunda, outros 100 mL foram utilizados para a lavagem e coletados em cadinho de porcelana para análise de sólidos totais. Por fim, 1 L de água era coletado em galão para análise de ovos de helmintos (Figura 4.1).



Figura 4.1 – Umedecimento do lodo com luvas (à esquerda) e limpeza das luvas para análise da água de lavagem (à direita).

No momento do plantio a análise da água de lavagem das luvas foi realizada para todos os tratamentos. Ao final dos experimentos essa análise foi feita apenas nos tratamentos que receberam a maior proporção de bio sólido e naqueles que apresentaram o melhor rendimento agrônômico (avaliado com base na altura das mudas).

A análise de sólidos totais da água da luva teve por finalidade averiguar a quantidade de sólido potencialmente retida na mão do trabalhador após o manuseio do lodo, ao passo que as análises de coliformes totais, *E. coli* e ovos de helmintos, tem por objetivo servir de contraprova ao resultado obtido no substrato. Entretanto, os resultados desses experimentos não foram utilizados para a estimativa de riscos.

#### **4.4.6. Análises laboratoriais.**

Para a análise de ovos viáveis de helmintos nas amostras de bio sólidos e bio sólidos misturados ao substrato Plantmax foi utilizada o método de Meyer *et al.* (1978), descrito sucintamente no capítulo 2. Essas mesmas amostras foram analisada para pH, sólidos totais e *Escherichia*

*coli* de acordo com os procedimentos descritos, respectivamente, em USEPA (2004), APHA (1998) e Environment Agency (2003).

As amostras de água de lavagem de luvas foram analisadas para ovos de helmintos (contagens totais), segundo a técnica descrita por Ayres e Mara (1996) (centrifugação flotação com sulfato de zinco). Nessas amostras foram também determinados os teores de sólidos totais e as concentrações de *E.coli*, segundo as recomendações do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998).

Além disso, foram realizadas análises da água coletada na torneira do laboratório utilizada para a lavagem das luvas (coliformes totais e *E. coli*).

Em todas as análises de *E. coli* foi utilizado o método do substrato enzimático o meio de cultura Colilert®. Todas as foram realizadas no Laboratório da Divisão de Água e Esgoto da Universidade Federal de Viçosa.

#### **4.5. Resultados e discussão**

Os resultados de cada tabela a seguir se referem aos tratamentos com maior proporção de bio-sólido e aqueles com maior produtividade (com base na altura da muda), de cada processo de higienização adotado e nas respectivas classes de lodo, nos dois momentos de análise (plantio e retirada das mudas dos tubetes, respectivamente, resultados 'inicial' e 'final').

De início, nas tabelas 4.1 e 4.2 são apresentados os resultados das análises do substrato Plantmax e da água utilizada na limpeza das luvas no tratamento testemunha. Foram encontrados coliformes totais em todas as amostras testemunha analisadas (água e substrato), mas esse grupo de bactérias não se presta à indicação de contaminação de origem fecal, por incluir diversos gêneros e espécies de vida livre (WHO, 2006a). Por sua

vez, *E.coli* (esse sim, um organismo indicador mais preciso de contaminação) não foi detectada. Portanto, ficou descartada a possibilidade de eventual contaminação das amostras e interferência nos tratamentos com uso do bioossólido.

Tabela 4.1 – Qualidade da água de lavagem das luvas e do substrato utilizado para crescimento das mudas de eucalipto, Tratamento testemunha (100% Plantmax).

<b>Substrato</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
pH	5	6,3	-
Sólidos totais	90,6%	30%	%
Coliformes totais	$2,9 \times 10^5$	$5,6 \times 10^3$	NMP gST <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	ND	ND	NMP gST <sup>-1</sup>
Ovos de helmintos	NR	NR	ovos viáveis por g ST
<b>Água de lavagem das luvas</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
Sólidos totais	2000	3300	mg L <sup>-1</sup>
Coliformes totais	$2,9 \times 10^3$	$1,7 \times 10^2$	NMP 100 mL <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	ND	ND	NMP 100 mL <sup>-1</sup>
Ovos de helmintos	NR	NR	ovos L <sup>-1</sup>

ND: não detectado. NR: não realizado

Tabela 4.2 – Qualidade da água de torneira utilizada na lavagem das luvas e no umedecimento do substrato nos tubetes.

<b>Substrato</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
Coliformes totais	$5,3 \times 10^1$	ND	NMP gST <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	ND	ND	NMP gST <sup>-1</sup>
Ovos de helmintos	NR	NR	ovos viáveis gST <sup>-1</sup>

ND: não detectado. NR: não realizado

Nas tabelas 4.3 a 4.6 são apresentados os resultados dos tratamentos com lodo caleado. Nesses tratamentos, em geral, foi registrado crescimento da população de *E. coli* ao final do experimento, muito provavelmente motivado também pelo umedecimento do bioossólido. Todavia, os riscos de infecção por este organismo na fase inicial (e mesmo na final) permaneceram baixos ( $10^{-4}$ - $10^{-6}$ ), em ambas as classes de lodo. A exceção ficou por conta do tratamento com lodo caleado Classe B e 25% de bioossólidos, quando a estimativa de risco para múltiplas exposições na

fase final foi de cerca de  $10^{-3}$ . Portanto, salvo a exceção registrada, a caleação parece ter 'eliminado' o risco de infecção bacteriana associado ao manuseio do biossólido no momento do plantio, mas a continuidade das atividades até a retirada das mudas dos tubetes poderia expor os trabalhadores a risco, ainda que baixos.

Ovos de helmintos foram detectados no biossólido no momento do plantio, mas as contagens diminuíram, na maioria das vezes, a níveis não detectáveis ao final dos experimentos. Nesse caso, a situação se inverteria, ou seja, a caleação não foi suficiente para eliminar o risco de infecção helmíntica no momento do manuseio do biossólido para plantio das mudas de eucalipto, mas o decaimento dos ovos de helmintos (por hipótese, devido à ação continuada do efeito da cal nos tubetes) dissiparia eventuais riscos associados às atividades de retiradas das mudas dos tubetes. Na fase inicial e para exposição única os riscos foram estimados em valores estimados acima do nível tomado com referência para risco tolerável ( $10^{-4}$ ). Para o cenário de exposições múltiplas os riscos estimados foram elevados, entre  $10^{-2}$  e  $10^{-1}$ . Nas atividades finais, devido ao 'desaparecimento dos ovos de helmintos', os riscos foram 'inexistentes', à exceção do tratamento com lodo caleado classe A e 50% de biossólidos (Tabela 4.4), situação em que foram detectados ovos de helmintos e estimados riscos da ordem de  $10^{-4}$  e  $10^{-2}$  para os cenários de, respectivamente exposição única e múltipla, similares, portanto aos riscos estimados para a fase inicial de manipulação deste mesmo tratamento.

Tabela 4.3 – Qualidade da água de lavagem das luvas e do biossólido/substrato utilizado para crescimento das mudas de eucalipto, Lodo caleado classe A, 100% de biossólidos.

<b>Substrato</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
pH	8,3	8,0	
Sólidos totais	90,4%	76 %	%
Coliformes totais	1,5x10 <sup>6</sup>	9x10 <sup>5</sup>	NMP gST <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	ND	2,6x10 <sup>3</sup>	NMP gST <sup>-1</sup>
Risco infecção <i>E.coli</i> - exposição única	-	5,2x10 <sup>-6</sup>	(1)
Risco infecção <i>E.coli</i> – múltiplas exposições	-	4,7x 10 <sup>-4</sup>	(2)
Ovos de helmintos	0,36	ND	ovos viáveis por gST
Risco infecção helmintos - exposição única	6,8x10 <sup>-4</sup>	-	(1)
Risco infecção helmintos - múltiplas exposições	5,9 x10 <sup>-2</sup>	-	(2)

<b>Água de lavagem das luvas</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
Sólidos totais	1700	3600	mg L <sup>-1</sup>
Coliformes totais	2,4x10 <sup>4</sup>	2,4x10 <sup>4</sup>	NMP 100 mL <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	ND	3,1	NMP 100 mL <sup>-1</sup>
Ovos de helmintos	388,3	110,8	ovos L <sup>-1</sup>

(1) por pessoa por dia; (2) por pessoa em 90 dias. ND: não detectado.

Tabela 4.4 – Qualidade da água de lavagem das luvas e do biossólido/substrato utilizado para crescimento das mudas de eucalipto, Lodo caleado classe A, 50% de biossólidos.

<b>Substrato</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
pH	7,8	8,2	-
Sólidos totais	87,8%	71,9%	%
Coliformes totais	2,2x10 <sup>5</sup>	1,8x10 <sup>6</sup>	NMP gST <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	ND	ND	NMP gST <sup>-1</sup>
Risco infecção <i>E.coli</i> - exposição única	-	-	(1)
Risco infecção <i>E.coli</i> – múltiplas exposições	-	-	(2)
Ovos de helmintos	0,18	0,27	ovos viáveis por gST
Risco infecção helmintos - exposição única	3,4x10 <sup>-4</sup>	5,1x10 <sup>-4</sup>	(1)
Risco infecção helmintos - múltiplas exposições	3x10 <sup>-2</sup>	4,5x10 <sup>-2</sup>	(2)

<b>Água de lavagem das luvas</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
Sólidos totais	NR	3600	mg L <sup>-1</sup>
Coliformes totais	NR	2,4x10 <sup>4</sup>	NMP 100 mL <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	NR	ND	NMP 100 mL <sup>-1</sup>
Ovos de helmintos	NR	110,8	ovos L <sup>-1</sup>

(1) por pessoa por dia; (2) por pessoa em 90 dias. ND: não detectado. NR: não realizado.

Tabela 4.5 – Qualidade da água de lavagem das luvas e do bio-sólido/substrato utilizado para crescimento das mudas de eucalipto, Lodo caleado classe B, 100% de bio-sólidos.

<b>Substrato</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
pH	11,7	7,9	-
Sólidos totais	96,9%	92%	%
Coliformes totais	$1,1 \times 10^3$	$3,8 \times 10^6$	NMP gST <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	ND	$5,4 \times 10^1$	NMP gST <sup>-1</sup>
Risco infecção <i>E.coli</i> - exposição única	-	$1,1 \times 10^{-7}$	(1)
Risco infecção <i>E.coli</i> – múltiplas exposições	-	$9,8 \times 10^{-6}$	(2)
Ovos de helmintos	1,08	ND	ovos viáveis por gST
Risco infecção helmintos - exposição única	$2 \times 10^{-3}$	-	(1)
Risco infecção helmintos - múltiplas exposições	$1,7 \times 10^{-1}$	-	(2)

<b>Água de lavagem das luvas</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
Sólidos totais	1800	3600	mg L <sup>-1</sup>
Coliformes totais	$2,4 \times 10^4$	$2,4 \times 10^4$	NMP 100 mL <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	ND	ND	NMP 100 mL <sup>-1</sup>
Ovos de helmintos	377,30	ND	ovos L <sup>-1</sup>

(1) por pessoa por dia; (2) por pessoa em 90 dias. ND: não detectado.

Tabela 4.6 – Qualidade da água de lavagem das luvas e do bio-sólido/substrato utilizado para crescimento das mudas de eucalipto, Lodo caleado classe B, 25% de bio-sólidos.

<b>Substrato</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
pH	5,2	7,9	-
Sólidos totais	70,2%	88,3%	%
Coliformes totais	$6,8 \times 10^4$	$1,5 \times 10^6$	NMP gST <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	ND	$1,4 \times 10^4$	NMP gST <sup>-1</sup>
Risco infecção <i>E.coli</i> - exposição única	-	$2,8 \times 10^{-5}$	(1)
Risco infecção <i>E.coli</i> – múltiplas exposições	-	$2,5 \times 10^{-3}$	(2)
Ovos de helmintos	0,27	ND	ovos viáveis por gST
Risco infecção helmintos - exposição única	$5 \times 10^{-4}$	-	(1)
Risco infecção helmintos - múltiplas exposições	$4,5 \times 10^{-2}$	-	(2)

<b>Água de lavagem das luvas</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
Sólidos totais	1700	3600	mg L <sup>-1</sup>
Coliformes totais	$2,4 \times 10^4$	$2,4 \times 10^4$	NMP 100 mL <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	ND	3,1	NMP 100 mL <sup>-1</sup>
Ovos de helmintos	388,3	110,8	ovos L <sup>-1</sup>

(1) por pessoa por dia; (2) por pessoa em 90 dias. ND: não detectado.

Nos tratamentos com lodo caleado (tabelas 4.3 a 4.6), em geral, o pH do conteúdo dos tubetes apresentou valor inferior ao que se encontrava ao final da higienização (pH=12), muito provavelmente pelo fato do biossólido ter sido umedecido antes do semeio. Não obstante, os valores de pH permaneceram elevados salvo uma exceção, no tratamento com menor proporção de biossólido caleado (Tabela 4.6).

Os teores de sólidos totais na água de limpeza das luvas foram elevados, e sempre mais elevados na manipulação final dos experimentos, ou seja na retirada das muda dos tubetes. Observa-se também, nesse aspecto, que os resultados das manipulações inicial e final de todos os tratamentos são consistentes entre si. As concentrações de *E.coli* nas águas de limpeza das luvas foram, quando detectadas, baixas, e, em geral, condizentes com os resultados do conteúdo dos tubetes. Por outro lado, foram encontradas contagens elevadas de ovos de helmintos nas águas de limpeza das luvas na fase inicial experimentos; na fase final também e, embora em contagens menores que na fase inicial, foram encontrados ovos mesmo em eventos em que não foram detectados nos tubetes, indicando que havia ovos remanescentes no conteúdo dos tubetes a despeito de não terem sido detectados.

Nas tabelas 4.7 a 4.10 são apresentados os resultados dos tratamentos com lodo de estufa. Como referido no item 4.4.3, com o umedecimento do substrato contendo lodo de estufa foi observado crescimento de *E.coli* de até três unidades logarítmicas 24-48 horas após preparo dos tubetes. Dessa forma, o biossólido não mais apresentou características condizentes com as classes A e B, embora se tenha mantido tais denominações nas tabelas 4.7 a 4.10.

As populações de *E.coli* apresentaram decaimento no decorrer dos experimentos, de populações iniciais em torno de  $10^6$  organismos por 100 mL até  $10^2$ - $10^3$  organismos por 100 mL. Assim, na fase inicial as estimativas de risco de infecção bacteriana permaneceram elevadas e próximas a  $10^{-3}$ - $10^{-2}$  para o cenário de exposição única e em torno de  $10^{-1}$

para a exposição continuada. Por outro lado, as concentrações de *E. coli* verificadas na fase final implicariam estimativas de risco bem mais baixas, da ordem de  $10^{-7}$ - $10^{-6}$  e  $10^{-5}$ - $10^{-4}$ , respectivamente para os cenários de exposição única e continuada, ou seja, no entorno ou na maioria dos casos abaixo do nível de risco assumido como tolerável ( $10^{-4}$ ).

Tabela 4.7 – Qualidade da água de lavagem das luvas e do biofóssido/substrato utilizado para crescimento das mudas de eucalipto, Lodo de estufa classe A, 100% de biofóssidos.

<b>Substrato</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
pH	6,5	5,5	-
Sólidos totais	82,7%	61,8%	%
Coliformes totais	$1,1 \times 10^7$	$5,7 \times 10^5$	NMP gST <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	$6,1 \times 10^6$	$1,2 \times 10^3$	NMP gST <sup>-1</sup>
Risco infecção <i>E.coli</i> - exposição única	$1,2 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-6}$	(1)
Risco infecção <i>E.coli</i> – múltiplas exposições	$6,6 \times 10^{-1}$	$2,2 \times 10^{-4}$	(2)
Ovos de helmintos	0,13	ND	ovos viáveis por gST
Risco infecção helmintos - exposição única	$2,5 \times 10^{-4}$	-	(1)
Risco infecção helmintos - múltiplas exposições	$2,2 \times 10^{-2}$	-	(2)
<b>Água de lavagem das luvas</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
Sólidos totais	1500	4100	mg L <sup>-1</sup>
Coliformes totais	$2,4 \times 10^4$	$2,4 \times 10^4$	NMP 100 mL <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	$1,9 \times 10^3$	$1,1 \times 10^2$	NMP 100 mL <sup>-1</sup>
Ovos de helmintos	166,5	320	ovos L <sup>-1</sup>

(1) por pessoa por dia; (2) por pessoa em 90 dias. ND: não detectado.

Tabela 4.8 – Qualidade da água de lavagem das luvas e do bio-sólido/substrato utilizado para crescimento das mudas de eucalipto, Lodo de estufa classe A, 75% de bio-sólidos.

<b>Substrato</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
pH	6,2	5,4	-
Sólidos totais	90,1%	88,6%	%
Coliformes totais	$9,9 \times 10^6$	$4,1 \times 10^5$	NMP gST <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	$3,6 \times 10^6$	$3 \times 10^3$	NMP gST <sup>-1</sup>
Risco infecção <i>E. coli</i> - exposição única	$7 \times 10^{-3}$	$5,9 \times 10^{-6}$	(1)
Risco infecção <i>E. coli</i> – múltiplas exposições	$4,7 \times 10^{-1}$	$5,3 \times 10^{-4}$	(2)
Ovos de helmintos	0,09	ND	ovos viáveis por gST
Risco infecção helmintos - exposição única	$1,71 \times 10^{-4}$	-	(1)
Risco infecção helmintos - múltiplas exposições	$1,52 \times 10^{-2}$	-	(2)

<b>Água de lavagem das luvas</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
Sólidos totais	NR	4600	mg L <sup>-1</sup>
Coliformes totais	NR	$2,4 \times 10^4$	NMP 100 mL <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	NR	$4,3 \times 10^2$	NMP 100 mL <sup>-1</sup>
Ovos de helmintos	NR	390,9	ovos L <sup>-1</sup>

(1) por pessoa por dia; (2) por pessoa em 90 dias. ND: não detectado. NR: não realizado

Tabela 4.9 – Qualidade da água de lavagem das luvas e do bio-sólido/substrato utilizado para crescimento das mudas de eucalipto, Lodo de estufa classe B, 100% de bio-sólidos.

<b>Substrato</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
pH	5,7	4,8	-
Sólidos totais	95,4%	90,9%	%
Coliformes totais	$5,7 \times 10^6$	$1,5 \times 10^6$	NMP gST <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	$1,8 \times 10^6$	$2,5 \times 10^3$	NMP gST <sup>-1</sup>
Risco infecção <i>E. coli</i> - exposição única	$3,7 \times 10^{-3}$	$4,9 \times 10^{-6}$	(1)
Risco infecção <i>E. coli</i> – múltiplas exposições	$2,8 \times 10^{-1}$	$4,4 \times 10^{-4}$	(2)
Ovos de helmintos	2,13	1,75	ovos viáveis por gST
Risco infecção helmintos - exposição única	$4 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-3}$	(1)
Risco infecção helmintos - múltiplas exposições	$3 \times 10^{-1}$	$2,6 \times 10^{-1}$	(2)

<b>Água de lavagem das luvas</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
Sólidos totais	1800	16400	mg L <sup>-1</sup>
Coliformes totais	$2,4 \times 10^4$	$2,4 \times 10^4$	NMP 100 mL <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	$1,9 \times 10^4$	$4,5 \times 10^2$	NMP 100 mL <sup>-1</sup>
Ovos de helmintos	566	93,20	ovos L <sup>-1</sup>

(1) por pessoa por dia; (2) por pessoa em 90 dias. ND: não detectado.

Tabela 4.10 – Qualidade da água de lavagem das luvas e do biossólido/substrato utilizado para crescimento das mudas de eucalipto, Lodo de estufa classe B, 50% de biossólidos.

<b>Substrato</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
pH	5,3	4,8	-
Sólidos totais	80,8%	91,6%	%
Coliformes totais	$1,1 \times 10^7$	$1,5 \times 10^6$	NMP gST <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	$1,4 \times 10^6$	$1,1 \times 10^2$	NMP gST <sup>-1</sup>
Risco infecção <i>E.coli</i> - exposição única	$8,2 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-7}$	(1)
Risco infecção <i>E.coli</i> – múltiplas exposições	$7,1 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-5}$	(2)
Ovos de helmintos	1,06	1,52	ovos viáveis por gST
Risco infecção helmintos - exposição única	$2 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-3}$	(1)
Risco infecção helmintos - múltiplas exposições	$1,6 \times 10^{-1}$	$2,6 \times 10^{-1}$	(2)
<b>Água de lavagem das luvas</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Unidade</b>
Sólidos totais	NR	1700	mg L <sup>-1</sup>
Coliformes totais	NR	$2,4 \times 10^4$	NMP 100 mL <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	NR	1	NMP 100 mL <sup>-1</sup>
Ovos de helmintos	NR	53,33	ovos L <sup>-1</sup>

(1) por pessoa por dia; (2) por pessoa em 90 dias. ND: não detectado. NR: não realizado.

Nos tratamentos com biossólidos Classe A, os ovos de helmintos foram detectados no biossólido no momento do plantio, mas caíram a níveis não detectáveis ao final dos experimentos, muito provavelmente devido às contagens iniciais já reduzidas. De qualquer forma, as estimativas de risco na fase inicial foram ‘aceitáveis’ (em torno de  $10^{-4}$ ) apenas para o cenário de exposição única, enquanto que para múltiplas exposições estiveram próximos a  $10^{-2}$  (tabelas 4.7 e 4.8). Para a classe B, com contagens iniciais mais elevadas e decaimento pouco acentuado (quando houve), as estimativas de risco foram sempre elevadas, em torno de  $10^{-3}$  e  $10^{-1}$ , respectivamente para os cenários de exposição única e múltipla, tanto nas atividades de plantio quanto nas de transposição das mudas (tabelas 4.9 e 4.10). Portanto, assim, como no caso do biossólido caleado, o manuseio do biossólido nas atividades de preparação para o plantio imporia riscos elevados de infecção helmíntica, principalmente no caso de exposição continuada. Entretanto a julgar pelos resultados ‘finais’

e para o biossólido Classe A, na etapa de retirada das mudas para transposição para o solo o risco ver-se-ia minimizado.

Nos tratamentos com lodo de estufa, naturalmente, o conteúdo dos tubetes apresentou valores de pH inferiores aos dos de lodo caleado, e tenderam a decrescer do plantio ao final dos experimentos.

Assim como no caso do lodo caleado, os teores de sólidos totais na água de limpeza das luvas foram elevados, e mais elevados nas atividades de retirada das muda dos tubetes. Porém, as concentrações de *E.coli* nas águas de limpeza das luvas foram bem mais elevadas (salvo no tratamento com lodo classe B e 50% de biossólidos – Tabela 4.10), coerentemente com os resultados do conteúdo dos tubetes. Também nesse caso foram encontradas contagens elevadas de ovos de helmintos nas águas de limpeza das luvas, mesmo quando não foram detectados ovos no conteúdo dos tubetes na fase final dos experimentos com lodo classe A (Tabelas 4.7 e 4.8).

#### **4.6. Considerações finais**

Este trabalho compreende iniciativa, quiçá pioneira, de construção de cenários de exposição e de estimativas de risco ocupacional específicas para o uso de biossólidos no cultivo de mudas arbóreas em viveiro.

Os resultados sugerem a existência sim de risco ocupacional e que medidas de proteção devem ser tomadas, tais como a utilização de equipamentos de proteção individual.

Os resultados destacam também a importância do tipo de biossólido utilizado. De acordo com as estimativas realizadas, o uso de lodo caleado praticamente não incorreria em riscos relevantes de infecção bacteriana. Entretanto, em relação aos helmintos, o uso do lodo caleado, mesmo de Classe A, sugere a imposição de riscos ao trabalhador, associados, principalmente, a atividades continuadas de plantio. Por outro lado, os

riscos associados às atividades de transposição das mudas parecem ser minimizados em função do decaimento dos números de ovos de helmintos até a retirada das mudas dos tubetes.

O uso de lodo de estufa parece também impor maiores riscos de infecção, principalmente para cenários de múltiplas exposições, tanto bacteriana quanto helmíntica, em ambas classes de lodo. Ressalva-se, mais uma vez, que os valores de *E. coli* empregados foram aqueles posteriores ao umedecimento do lodo, ou seja, quando não mais apresentava qualidade de classe A ou B. Emerge aqui uma questão importante, pois a regulamentação brasileira não contempla esse controle pós-produção, ou seja, no momento ou durante a aplicação do bioestabilizado.

Feitos esses destaques as seguintes ressalvas sobre os resultados devem ser também considerados. Em geral, se pode dizer que as estimativas de risco são pouco precisas e conservadoras. Como já referido, as estimativas de infecção bacteriana foram feitas com dados de *E.coli* e modelos dose-resposta de *E.coli* O:157 e, por suposto, as concentrações de *E.coli* O:157 eventualmente presentes seriam bem mais baixas do que os valores utilizados. Como também já mencionado, as estimativas de doses foram feitas considerando a ingestão de 20 mg de bioestabilizados por dia, mas isso desconsidera o efeito da mistura bioestabilizados + Plantmax dos vários tratamentos analisados

Além disso, já se ponderou que, de acordo com a literatura, a própria taxa de ingestão assumida (20 mg d<sup>-1</sup>) pode levar a superestimativas de risco. Por sua vez, análise da água de lavagem das luvas indicaram a aderência de 180-460 mg de partículas sólidas nas luvas de borracha. Resta saber quanto disso ficaria aderido à pele (no caso de trabalho sem luvas) e, em todo caso, quanto seria ingerido involuntariamente via mecanismo mão-boca.

Por outro lado, a não detecção de patógenos (principalmente de ovos de helmintos) nos conteúdos dos tubetes e, por conseguinte, a

dedução pela inexistência de risco, mas a detecção na água de lavagem das luvas suscita dúvidas de que eventualmente os riscos estariam subestimados. É importante também ressaltar que houve indícios de crescimento bacteriano nos tubetes e que isso, se não considerado, poderia também incorrer em subestimativas de risco.

Também é preciso mais uma vez registrar que o modelo utilizado para a estimativa de risco de infecção helmíntica é passível de críticas.

Outra limitação do presente estudo reside no uso de modelos determinísticos, sendo que própria variação dos resultados obtidos sugere o uso de modelos estocásticos. Enfim, em que pese o mérito da presente contribuição sugere-se que exercícios futuros busquem o refinamento da modelagem de risco, incluindo o monitoramento de outros patógenos e o refinamento também dos cenários de exposição.

#### **4.7. Referências**

AMOA, P.; DRECHSEL, P.; ABAIDOO, R. C.; HENSELER, M. Irrigated urban vegetable production in Ghana: microbiological contamination in farms and markets and associated consumer risk groups. *Journal of Water and Health*, v. 5, n.3, p 455-466, 2007.

APHA - American Public Health Association; AWWA - American Water Works Association; WEF - Water Environment Federation. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20th ed. New York: APHA, AWWA, WEF, 1998.

AYRES, R. M.; MARA, D.D. *Analyses of wastewater for use in agriculture. A laboratory manual of parasitological and bacteriological techniques* Geneva: WHO, 1996, 35p.

BASTOS, R. K. X.; BEVILACQUA, P. D.; SILVA, C. A. B.; SILVA, C. V. Wastewater irrigation of salad crops: further evidence for the evaluation of

the WHO guidelines. *Water Science and Technology*, v. 57, n.8, p.1213-1219, 2008.

BASTOS, R. K. X.; BEVILACQUA, P. D; DIAS, G. M. F.; BARONY, F. J. A. Análise crítica da legislação brasileira para uso agrícola de lodos de esgotos na perspectiva da avaliação quantitativa de risco microbiológico. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica*, v.2, n.1, p.143-59, 2009

BASTOS, R. K. X. *Quantitative microbial risk analysis applied to biosolids use in agriculture: a state of the art review*. 2010, 67f. Monografia (Pós doutorado) – School of Civil Engineering, University of Leeds, Leeds, UK. 2010a.

BASTOS, R. K. X. *Quantitative microbial risk analysis applied to wastewater use in agriculture: a state of the art review*. 2010, 151f. Monografia (Pós doutorado) – School of Civil Engineering, University of Leeds, Leeds, UK. 2010b.

BEECHER, N.; HARRISON, E.; GOLDSTEIN, N.; MCDANIEL, M.; FIELD, P.; SUSSKIND L. Risk perception, risk communication, and stakeholder involvement for biosolids management and research. *Journal of Environmental Quality*, v. 34, n.1, p.122-128, 2005.

CHROSTOWSKI, P. C.; O'DETTE, R. G.. Demystifying the great biosolids debate. Sound science removes emotion from decisions about biosolids recycling. *Pollution Engineering*, v.34, n.8, p. 23-7, 2002.

ENVIRONMENT AGENCY. *The Microbiology of Sewage Sludge (2003) - Part 3 - Methods for the isolation and enumeration of Escherichia coli, including verocytotoxigenic Escherichia coli. Methods for the examination of waters and associated materials*. Bristol, UK: Environment Agency, 2003.

Disponível em:

<[http://www.environmentagency.gov.uk/static/documents/Research/mss2003\\_part\\_3\\_604573.pdf](http://www.environmentagency.gov.uk/static/documents/Research/mss2003_part_3_604573.pdf)>. Acesso: 05 Jun. 2009.

EISENBERG, J.N.S.; MOORE, K.; SOLLER, J.A.; EISENBERG, D.; COLFORD, J.M. Microbial risk assessment framework for exposure to

amended sludge projects. *Environmental Health Perspectives*, v.116, n.6, p.727-33, 2008.

FARRELL, J.B. Pathogen reduction requirements of 40 CFR Part 503: their origin, evaluation, new reduction approaches. In: SMITH, J.E.; MILLNER, P.D.; JAKUBOWSKI, W.; GOLDSTEIN, N.; RYNK, R. *Contemporary perspectives on infectious disease agents in sewage sludge and manure*. Emmaus: The JG Press Inc, p.217-229. 2005.

FINLEY, B.; PROCTOR, D.; SCOTT, P.; HARRINGTON, N.; PAUSTENBACH, D.; PRICE, P. Recommended distributions for exposure factors frequently used in health risk assessment. *Risk Analysis*. v.14, n.4, p..533-53, 1994.

GALE. P. Using event trees to quantify pathogen levels on root crops from land application of treated sewage sludge. *Journal of Applied Microbiology* v. 94, n.1, p.35–47, 2003.

GALE. P. Land application of treated sewage sludge: quantifying pathogen risks from consumption of crops. *Journal of Applied Microbiology*, v.98, n.2, p.380-96, 2005.

GERBA, C. P.; PEPPER, I. L.; WHITEHEAD, L. F. III. A risk assessment of emerging pathogens of concern in the land application of biosolids. *Water Science and Technology*, v.46, n.10 p 225-230, 2002.

GERBA, C.P.; CAMPO, N.C.; BROOKS, J.P.; PEPPER, I.L. Exposure and risk assessment of *Salmonella* in recycled residuals. *Water Science and Technology*. v.57, n.7, p.1061-65, 2008.

HAAS, C.N.; ROSE, J.; GERBA, C.P. *Quantitative microbial risk assessment*. New York: John Wiley & Sons, 449p. 1999.

HAMILTON, A. J.; STAGNITTI, F.; PREMIER, R. BOLAND, A. M.; HALE, G. Quantitative microbial risk assessment models for consumption of raw vegetables irrigated with reclaimed water. *Applied and Environmental Microbiology*, .v. 72, n. 5, p.3284–3290, 2006.

- HAMILTON, A. J.; STAGNITTI, F. Deterministic versus stochastic quantitative microbial risk assessment models for wastewater irrigation of food crops. *Acta Horticulturae*. (ISHS) 792:333-339, 2008.
- HUNTER, P.R.; FEWTRELL, L. Acceptable risk. In: FEWTRELL, L.; BARTRAM, J. (eds.) *Water Quality. Guidelines, standards and health: assessment of risk and risk management for water-related infectious disease*. London: WHO, IWA Publishing; p. 207-227. 2001.
- JENKINS, S.R.; ARMSTRONG, C.W.; MONTI, M.M. *Health effects of biosolids applied to land: Available scientific evidence*. Virginia, 2007. 34 p.  
Disponível em:  
<[www.vdh.state.va.us/epidemiology/DEE/documents/Biosolidsfinal.pdf](http://www.vdh.state.va.us/epidemiology/DEE/documents/Biosolidsfinal.pdf)>.  
Acesso em: 02 nov 2009.
- MARA, D. D. P. SLEIGH, A.; BLUMENTHAL, U. J.; CARR, R. M. Health risks in wastewater irrigation: Comparing estimates from quantitative microbial risk analyses and epidemiological studies. *Journal of Water and Health*, v.5, n.1, p 39-50, 2007.
- MEYER, K. B.; MILLER, K. D.; KANESHIRO, E. S. Recovery of *Ascaris* eggs from sludge. *The Journal of Parasitology*. v.64, n.2. p. 380-383. 1978.
- NAVARRO, I; JIMÉNEZ, B; CIFUENTES, E; LUCARIO, S. A. Quantitative microbial risk assessment of helminth ova in reusing sludge for agricultural production in developing countries. *Journal of Water and Health*, v. 7, n.1, p 31-44, 2009.
- NRC. NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Biosolids applied to land: advancing standards and practices*. Washington, DC: National Academy Press, 282 p. 2002.
- SCHAECHTER, M.; ENGLEBERG, N. C.; EISENTEIN, B. I.; MEDOFF, G. *Microbiologia: mecanismos das doenças infecciosas*. 3ªed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 641p. 2002.
- SHEPPARD, S. C. Parameter values to model the soil ingestion pathway. *Environmental Monitoring and Assessment* 34: 27-44, 1995.

SIMMONDS, C. Pathogens in biosolids: risks and regulations. In: SMITH, J.E.; MILLNER, P.D.; JAKUBOWSKI, W.; GOLDSTEIN, N.; RYNK, R. *Contemporary perspectives on infectious disease agents in sewage sludge and manure*. Emmaus: The JG Press Inc, p 231-8. 2005.

USEPA-UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Environmental regulations and technology. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge (including domestic septage) under 40 CFR Part 503*. Cincinnati: USEPA, 2003. 186 p (EPA/625/R-92/013). Disponível em: <<http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/625r92013/625r92013.htm>>. Acesso em: 21 out 2009.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Test Methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods. SW 846. Method 9045 D - Soil and waste pH*. Washinton DC: USEPA, 2004. Disponível em: <[http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/online/9\\_series.htm](http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/online/9_series.htm)>. Acesso em 15 Maio 2009.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *National primary drinking water regulations: Long term 2 enhanced surface water treatment rule*. Final Rule. Washington DC, Federal Register, Part II, 40CFR, Parts 9, 141 and 142 P. 653-786p., 2006.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater*. Volume 2: Wastewater use in agriculture. Geneva: WHO, 213 p. 2006a.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Guidelines for drinking water quality [electronic resource]: Incorporating first addendum*. Vol. 1, Recommendations. 3.ed. Geneva: WHO, 595p. 2006b.

## 5. Conclusões Gerais

Por meio da caleação (50% CaO), o padrão de biossólido Classe B foi alcançado entre sete e 12 dias; a condição de Classe A foi obtida entre 29 e 70 dias. No tratamento do lodo por secagem em estufa, o padrão Classe B foi alcançado entre 35 e 56 dias; o padrão Classe A demandou 100 dias em um dos lotes de lodo produzidos, mas não foi alcançado em dois outros lotes decorridos 97 e 117 dias de tratamento.

Tendo em vista o uso florestal (produção de mudas), o tratamento do lodo por secagem em estufa resultou em biossólidos com propriedades químicas melhores do que o produzido por caleação.

A manipulação do biossólido produzido pelos dois processos de higienização não se mostrou viável antes de 40 dias de armazenamento devido ao elevado teor de elevada umidade, o que demandou procedimentos adicionais de condicionamento do biossólido (moagem e secagem à sombra) para posterior enchimento dos tubetes para plantio de mudas de eucalipto.

Misturas com de 50% de biossólidos + 50% de substrato Plantmax e, ou com 75% de biossólidos + 25% de substrato Plantmax proporcionaram os melhores desenvolvimentos das mudas de eucalipto. Em termos gerais, o biossólido produzido em estufa promoveu melhores resultados do que o biossólido caleado.

Guardadas as devidas ressalvas em função das limitações do modelo de avaliação quantitativa de risco utilizado, infere-se que atividade de produção de mudas em viveiro envolvem risco ocupacional e que medidas de proteção devem ser tomadas, tais como a utilização de equipamentos de proteção individual.