

Ana Lúcia Colares Lopes Rocha

HIGIENIZAÇÃO DE LODO ANAERÓBIO DE ESGOTO POR MEIO ALCALINO
ESTUDO DE CASO DA ETE LAGES – APARECIDA DE GOIÂNIA - GO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção de título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Rogério de Araújo Almeida

Goiânia
2009

Ana Lúcia Colares Lopes Rocha

**HIGIENIZAÇÃO DE LODO ANAERÓBIO DE ESGOTO POR MEIO
ALCALINO – ESTUDO DE CASO DA ETE LAGES – APARECIDA DE
GOIÂNIA - GO**

Dissertação defendida e aprovada em 25 de agosto de 2009 pela Banca Examinadora
constituída pelos professores:



Prof. Dr. Rogério de Araújo Almeida
Presidente da Banca



Prof. Dr. Ricardo Silveira Bernardes
Membro efetivo



Prof. Dr. Eraldo Henriques de Carvalho
Membro efetivo

“A vida é a arte do encontro” (Fernando Pessoa)
Dedico, em Goiás,
às pessoas queridas que encontrei: Luiz Carlos, meu esposo,
Luiz Antônio e Francisca (sempre presentes), Lusimar, Leide, Geiva e Isabel;

Dedico, em Minas,
aos meus queridos irmãos, à tia Dina e
aos meus pais, Anna Luíza e Aníbal (sempre presentes).

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por tudo.

Agradeço aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente – PPGEMA, da UFG, especialmente ao meu orientador Prof. Dr. Rogério de Araújo Almeida, pelas contribuições e forma democrática e gentil que conduziu todo o trabalho e ao Prof. Dr. José Carlos Seraphim, do Instituto de Matemática e Estatística, pelo auxílio na realização das análises dos dados.

Agradeço as manifestações de apoio da Diretoria de Produção e da Superintendência de Serviços do Interior da Saneamento de Goiás SA – Saneago, em especial às colaborações dos colegas da Gerência de Suporte ao Tratamento de Esgoto: Eng^o Áttila Moraes Jardim Júnior, Técnica e Bióloga Denise Barini Botelho e demais colegas; da Supervisão do Laboratório de Esgoto: Biólogas Maura Francisca da Silva e Eliete Ribeiro da Silva, e toda a equipe de técnicos do laboratório; da Gerência de Tratamento de Esgotos: Eng^a Marisa Pignataro Sant’Anna, Eng^o Fausto Batista Alves dos Santos e demais técnicos e operadores da Estação de Tratamento de Esgotos - ETE Lages. Todas as informações recebidas, o apoio de campo e a realização das análises laboratoriais foram essenciais para o desenvolvimento da pesquisa.

Finalmente, agradeço aos meus familiares e amigos pelo incentivo e apoio.

RESUMO

O presente trabalho objetivou avaliar a eficiência da higienização alcalina do lodo de esgoto sanitário, produzido no reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), da Estação de Tratamento de Esgotos – ETE Lages, localizada em Aparecida de Goiânia–GO e operada pela Saneamento de Goiás S.A. – Saneago. O lodo desaguado em leitos de secagem, com umidade média de 47,55%, foi misturado em betoneira com cal hidratada e com cal virgem, caracterizando 2 experimentos. As cales foram misturadas ao lodo de esgoto e estabelecidos quatro tratamentos, um testemunha, sem adição de cal, e os demais nas concentrações de 12,6%, 21% e 29,4%, para cada experimento, com três repetições. Foram coletadas amostras do lodo higienizado de cada tratamento logo após a mistura a 0, 15, 30, 60, 90 e 120 dias após a mistura. Avaliaram-se os coliformes termotolerantes, ovos totais e ovos viáveis de helmintos, sólidos voláteis, sólidos totais, pH e umidade. Todos os tratamentos dos dois experimentos atenderam à condição de redução de atratividade de vetores, citada no anexo I da resolução Conama nº375, exceto o tratamento com cal hidratada na dosagem de 12,6% de cal. Embora tenha ocorrido o crescimento de coliformes termotolerantes, associado à queda do pH, em alguns tratamentos durante o período de estocagem, em todos os resultados de ambos os experimentos, os valores estiveram abaixo do limite estabelecido pela resolução Conama nº375 para lodos tipo A, de 1.000 NMP.g.MS⁻¹. Dentre as espécies de ovos viáveis de helmintos identificadas, *Ascaris sp.* foi predominante. Todos os tratamentos com cal virgem atingiram concentrações de ovos viáveis de helmintos abaixo de 0,25 ovo.g.MS⁻¹, limite para lodos tipo A, logo após a higienização, exceto para o tratamento com 12,6% de cal. Nos tratamentos com a cal hidratada, essa condição foi atendida aos 15 dias, exceto para o tratamento cuja dosagem foi 12,6% de cal. Considerando o atendimento à resolução Conama nº375 para lodos tipo A, com relação aos parâmetros de coliformes termotolerantes e ovos viáveis de helmintos, ambas as cales, virgem e hidratada, foram eficientes. Em função das dosagens aplicadas e do tempo de estocagem, os tratamentos com a cal virgem se destacaram pelo maior potencial de elevação e manutenção do pH e pela maior eficiência na remoção de coliformes termotolerantes e ovos viáveis de helmintos.

Palavras chave: Lodo de esgoto. Estabilização química. Calagem. Biossólido. Tratamento alcalino.

ABSTRACT

The aim of the present study was to evaluate the efficiency of the alkaline treatment of sanitary sewage sludge produced in the upflow anaerobic sludge blanket (UASB) of the Lages Sewage Treatment Plant, located in Aparecida de Goiânia, GO, Brazil and operated by Saneamento de Goiás, S.A. – Saneago. The sludge, which was dewatered into drying beds until a mean moisture of 47.55%, was mixed in a cement mixer with hydrated lime and quicklime in two experiments. The limes were mixed with sewage sludge and four treatments were established, one of them without lime and the others with concentrations of, 12.6%, 21% and 29.4% for each experiment, with three repetitions. Samples of the treated sludge in each treatment were collected 0, 15, 30, 60, 90 and 120 days after mixing. Thermotolerant coliforms, total helminth eggs, viable helminth eggs, volatile solids, total solids (TS), pH and moisture were evaluated. All treatments in the two experiments met the condition of reduction in vector attractiveness cited in appendix one of Conama resolution no.375 except the hydrated lime treatment, whose lime dosage was 12.6%. Although growth of thermotolerant coliforms occurred in association with the drop in pH in some treatments during the storage period, in all the results of both experiments the values were below the limit established in Conama resolution no.375 for type A sludge: 1,000 NMP.g.MS⁻¹. Among the species of viable helminth eggs identified, *Ascaris sp.* was predominated. All the treatments with quicklime reached concentrations of viable helminth eggs below 0.25 egg.g.MS⁻¹, the limit for type A sludge, immediately after mixing, except for the treatment with 12.6% of quicklime. For the hydrated lime treatments, this condition was met within 15 days except for the treatment whose lime dosage was 12.6%. Both, hydrated lime and quicklime, were efficient in meeting the requirements of Conama resolution no.375 for type A sludges in regard to the parameters for thermotolerant coliforms and viable helminth eggs. In terms of dosages applied and storage time, the quicklime treatments stood out because of their greater potential for raising and maintaining pH and because of their greater efficiency in removing thermotolerant coliforms and viable helminth eggs.

Keywords: Sewage sludge. Chemical stabilization. Liming. Biosolids. Alkaline treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1.1	Desenho esquemático do reator anaeróbio do tipo UASB.....	28
Figura 3.2.1	Representação esquemática do metabolismo de bactérias heterotróficas	31
Figura 4.2.1	Localização da ETE Lages.....	72
Figura 4.2.2	Vista parcial dos reatores UASB - ETE Lages.....	72
Figura 4.2.3	Vista parcial dos leitos de secagem - ETE Lages.....	72
Figura 4.2.4	Representação esquemática das unidades da ETE Lages.....	73
Figura 4.3.1	Dados de chuva acumulada mensal na Estação Automática Goiânia em 2008.....	76
Figura 4.4.1	Processo da mistura manual do lodo de esgoto com a cal, realizada no teste preliminar para a definição das concentrações de cal a serem utilizadas.....	78
Figura 4.4.2	Preparo do lodo para calagem (quebra dos torrões).....	79
Figura 4.4.3	Retirada do lodo caleado da betoneira.....	79
Figura 4.4.4	Tratamentos do experimento 2.....	80
Figura 4.4.5	Tratamentos agrupados experimentos 1 e 2.....	80
Figura 4.4.6	Amostrador do tipo “Trier” utilizado nas coletas de amostras.....	83
Figura 4.4.7	Amostragem de uma alíquota de lodo de um dos tratamentos.....	83
Figura 5.1.1	Temperaturas médias do ambiente e das amostras de lodo nos dias de coleta das amostras – experimento 1.....	87
Figura 5.1.2	Temperaturas média ambiente e das amostras do lodo nos dias das coletas das amostras – experimento 2.....	87
Figura 5.1.3	Temperaturas do lodo registradas após a mistura com cal virgem – experimento 2.....	88
Figura 5.1.4	Comportamento do pH do lodo nas primeiras horas após a mistura com a cal hidratada - experimento 1.....	90
Figura 5.1.5	Comportamento do pH do lodo nas primeiras horas após a mistura com a cal virgem - experimento 2.....	90
Figura 5.1.6	Comportamento do pH do lodo misturado às diferentes dosagens de cal hidratada ao longo do tempo - experimento 1.....	91

Figura 5.1.7	Comportamento do pH do lodo misturado às diferentes dosagens de cal virgem ao longo do tempo - experimento 2.....	91
Figura 5.1.8	Teores de umidade dos tratamentos em função do tempo de estocagem	93
Figura 5.2.1	Concentrações de Coliformes Termotolerantes ao longo do tempo - experimento 1 (cal hidratada).....	97
Figura 5.2.2	Concentrações médias de Coliformes Termotolerantes ao longo do tempo - experimento 2 (cal virgem).....	98
Figura 5.2.3	Concentrações de ovos viáveis de helmintos ao longo do tempo - experimento 1 (cal hidratada).....	102
Figura 5.2.4	Concentrações de ovos viáveis de helmintos ao longo do tempo - experimento 2 (cal virgem).....	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1.1	Principais características do esgoto sanitário.....	22
Quadro 3.1.2	Principais vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios de tratamento de esgotos.....	29
Quadro 3.2.1	Composição química típica de lodos crus e lodos digeridos.....	33
Quadro 3.2.2	Comparação do nível de nutrientes em fertilizantes comerciais e lodos de esgotos.....	33
Quadro 3.2.3	Composição de alguns adubos orgânicos em relação aos macronutrientes das plantas.....	34
Quadro 3.2.4	Composição de alguns adubos orgânicos em relação aos micronutrientes das plantas.....	34
Quadro 3.2.5	Relação entre o teor de sólidos secos, a umidade e a consistência do lodo.....	36
Quadro 3.2.6	Capacidade e produção de lodo dos sistemas de tratamento de esgotos do tipo UASB, operados pela Saneago.....	37
Quadro 3.2.7	Características e quantidades do lodo produzido e descartado da fase líquida em vários sistemas de tratamento de esgotos.....	39
Quadro 3.5.1	Principais vírus entéricos que podem estar presentes em lodos de esgotos domésticos, as doenças a eles associadas e seus hospedeiros.....	47
Quadro 3.5.2	Principais bactérias entéricas que podem estar presentes em lodos de esgotos domésticos, as doenças a eles associadas e seus hospedeiros.....	48
Quadro 3.5.3	Principais protozoários que podem estar presentes nos esgotos e nos lodos.....	50
Quadro 3.5.4	Principais protozoários que podem estar presentes nos esgotos e nos lodos.....	51
Quadro 3.7.1	Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado segundo a patogenicidade	69
Quadro 3.7.2	Substâncias inorgânicas limites, presentes no lodo de esgoto ou produto derivado para uso agrícola.....	69
Quadro 3.7.3	Frequência de monitoramento do uso agrícola do lodo ou produto derivado.....	70

Quadro 4.2.1	Características dos esgotos brutos afluentes à ETE Lages – valores médios mensais de 2008.....	75
Quadro 4.3.1	Valores médios das temperaturas ambiente registradas na área da ETE no período diurno.....	77
Quadro 4.4.1	Resultados dos valores de pH das amostras de lodo misturadas às diversas concentrações de cal, nos dois experimentos.....	78
Quadro 4.4.2	Concentrações propostas e reais de cal virgem e de cal hidratada utilizadas no processo de higienização de lodo anaeróbio de esgoto sanitário.....	81
Quadro 4.4.3	Delineamento dos tratamentos empregados no estudo para os experimentos 1 e 2.....	81
Quadro 4.4.4	Calendário de coleta das amostras de lodo dos experimentos 1 e 2.....	83
Quadro 5.1.1	Temperaturas ambiente e temperaturas médias do lodo dos tratamentos do experimento 2, no dia seguinte da calagem do lodo com cal virgem (dia 24/06/08).....	89
Quadro 5.1.2	Concentrações de Sólidos voláteis em relação aos Sólidos totais para os experimentos 1 e 2.....	94
Quadro 5.2.1	Resultados de coliformes termotolerantes – experimento 1 (cal hidratada).....	96
Quadro 5.2.2	Resultados de coliformes termotolerantes – experimento 2 (cal virgem).....	96
Quadro 5.2.3	Identificação das espécies dos ovos viáveis de helmintos do lodo sem cal, ao longo do tempo – experimento 1 (cal hidratada).....	100
Quadro 5.2.4	Identificação das espécies dos ovos viáveis de helmintos do lodo sem cal, ao longo do tempo – experimento 2 (cal virgem).....	100
Quadro 5.2.5	Concentrações de ovos de helmintos viáveis e inviáveis ao longo do tempo - experimento 1(cal hidratada).....	101
Quadro 5.2.6	Concentrações de ovos de helmintos viáveis e inviáveis ao longo do tempo - experimento 2 (cal virgem).....	101
Quadro 5.3.1	Estimativa dos custos de implantação de um sistema simplificado de calagem de lodo.....	104
Quadro 5.3.2	Estimativa dos custos de operação de um sistema simplificado de calagem de lodo.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Resultados da análise de variância para o experimento 1 – cal hidratada	118
Tabela 2	Resultados da análise de variância para o experimento 2 – cal virgem...	118
Tabela 3	Resultados da análise de variância conjunta dos experimentos 1 e 2	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abes	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APHA	<i>American Public Health Association</i>
AWWA	<i>American Water and Wastewater Association</i>
Caesb	Companhia de Saneamento do Distrito Federal
Capes	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CEE	Comunidade Econômica Européia
CEF	Caixa Econômica Federal
Cetesb	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
Conama	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Copasa	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DAFA	Digestor Anaeróbico de Fluxo Ascendente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
Emater	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ESALQ	Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
EUA	Estados Unidos da América
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
hab	Habitante
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia

IPEF	Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais
NBR	Norma Brasileira
NMP	Número Mais Provável
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MS	Massa Seca
OD	Oxigênio Dissolvido
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
Prosab	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
RAFA	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
RAFAALL	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente Através de Leito de Lodo
RALF	Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado
RHAE	Programa de Capacitação de Recursos Humanos para Atividades Estratégicas
RMC	Região Metropolitana de Curitiba
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
Sabesp	Companhia de Saneamento de São Paulo
Saneago	Saneamento de Goiás S.A.
Sanepar	Companhia de Saneamento do Paraná
SDF	Sólidos Dissolvidos Fixos
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SDV	Sólidos Dissolvidos Voláteis
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SS	Sólidos em Suspensão
SSF	Sólidos Suspensos Fixos
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
ST	Sólidos Totais
STS	Sólidos Totais Sedimentáveis

SV	Sólidos Voláteis
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UFF	Unidade Formadora de Floco
UFP	Unidade Formadora de Placa
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

B	bário
°C	graus Celsius
Ca	cálcio
Ca ²⁺	íon cálcio
CaO	óxido de cálcio – cal virgem
Ca(OH) ₂	hidróxido de cálcio – cal hidratada
C/N	relação carbono nitrogênio
Cu	cobre
Fe	ferro
KJ	quilo Joule
K	potássio
Mg	magnésio
Mn	manganês
Mo	molibdênio
N	nitrogênio
NH ₃	íon amônia
NH ₄	amônia livre
NKT	nitrogênio <i>Kjeldahl</i> total
(OH) ⁻	íon hidroxila
P	fósforo
pH	potencial hidrogeniônico
S	enxofre
Zn	zinco
μm	micrômetro (10 ⁻⁶ m)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
2 OBJETIVOS.....	20
2.1 OBJETIVO GERAL.....	20
2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	21
3.1 TRATAMENTOS DE ESGOTOS SANITÁRIOS.....	21
3.1.1 Caracterização da quantidade e qualidade dos esgotos sanitários.....	21
3.1.2 Processos de Tratamento de Esgotos Sanitários.....	24
3.1.3 Sistemas de tratamento de esgotos por reatores anaeróbios.....	26
3.2 GERAÇÃO, COMPOSIÇÃO E PRODUÇÃO DE LODOS.....	29
3.2.1 O metabolismo bacteriano e a geração de lodo.....	30
3.2.2 Composição dos lodos de esgotos.....	33
3.2.3 Produção de lodos.....	35
3.3 PROCESSOS DE TRATAMENTO DOS LODOS.....	40
3.3.1 Processos de estabilização dos lodos.....	40
3.3.2 Processos de higienização dos lodos.....	41
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS LODOS ANAERÓBIOS DE REATORES UASB.....	42
3.4.1 Estabilização dos lodos de reatores do tipo UASB.....	42
3.4.2 Desaguamento de lodos anaeróbios de reatores UASB.....	43
3.5 HIGIENIZAÇÃO DOS LODOS POR PROCESSO ALCALINO.....	45
3.5.1 Microrganismos patógenos presentes no lodo de esgoto.....	46
3.5.2 Monitoramento da qualidade sanitária do lodo por organismos indicadores.....	52
3.5.3 Inativação de ovos de helmintos e coliformes termotolerantes em lodos higienizados com cal.....	53
3.5.4 Fatores determinantes no processo de calagem.....	54
3.5.5 Custos.....	60
3.5.6 Vantagens e desvantagens do processo.....	61
3.6 RECICLAGEM AGRÍCOLA DOS LODOS DE ESGOTOS.....	62
3.6.1 Breve histórico do uso agrícola do lodo no Brasil e no mundo.....	62
3.6.2 Aspectos de interesse agrônômico do lodo de esgoto.....	65
3.6.3 Aspectos legais da reciclagem agrícola do lodo no exterior	66
3.6.4 Aspectos legais da reciclagem agrícola do lodo no Brasil.....	67

4 METODOLOGIA.....	71
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	71
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS.....	72
4.2.1 Tratamento Preliminar.....	73
4.2.2 Tratamento Secundário.....	74
4.2.3 Esgotos afluentes à ETE Lages.....	74
4.2.4 O lodo produzido na ETE Lages.....	75
4.3 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DO PERÍODO DO EXPERIMENTO.....	76
4.4 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA.....	77
4.4.1 Definição das concentrações de cal a serem utilizadas.....	77
4.4.2 Calagem do lodo e delineamento dos tratamentos.....	79
4.4.3 Registros dos valores de temperatura.....	81
4.4.4 Registros dos valores de pH.....	82
4.4.5 Plano de coletas de amostras para análises laboratoriais.....	82
4.4.6 Caracterização das cales utilizadas nos experimentos.....	83
4.4.7 Análises laboratoriais.....	84
4.4.9 Tratamento estatístico dos dados.....	84
4.4.9 Avaliação dos custos.....	84
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	86
5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO LODO.....	86
5.1.1 Temperatura.....	86
5.1.2 pH.....	89
5.1.3 Teor de umidade.....	92
5.1.4 Sólidos Voláteis (SV) e Sólidos Totais (ST).....	94
5.2 PARÂMETROS MICROBIOLÓGICOS E PARASITOLÓGICOS.....	95
5.2.1 Coliformes Termotolerantes.....	95
5.2.2 Ovos de Helmintos.....	99
5.3 AVALIAÇÃO DOS CUSTOS.....	104
5.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	105
6 CONCLUSÃO.....	106
REFERÊNCIAS.....	107
ANEXO A - METODOLOGIAS DE ANÁLISES.....	114
APÊNDICE A – RESUMO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	118

1 INTRODUÇÃO

O tratamento de esgotos domésticos resulta na produção de um lodo rico em matéria orgânica e nutrientes, que necessita de uma disposição final adequada. Embora represente apenas de 1% a 2% do volume de esgoto tratado, a produção de lodos já se tornou um problema que, além de acumular passivos ambientais, pode representar de 20% a 60% dos custos operacionais de uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) (VON SPERLING; ANDREOLI, 2001).

Embora não se disponha de dados consistentes referentes à produção e disposição final de lodo no Brasil, as estimativas baseadas na população beneficiada por coleta e tratamento de esgotos apontam valores crescentes. Considerando a população total brasileira de 183.987.291 habitantes, segundo a contagem de população de 2007 (IBGE, 2007) e os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2007), o Brasil possui 42% da população atendida por coleta de esgotos, sendo que 32,5% dos esgotos coletados são tratados. Considerando uma produção *per capita* volumétrica de lodo desaguado entre 0,1 a 0,15 L.hab⁻¹.dia⁻¹ (faixa que representa os valores médios de produção *per capita* de lodo de diversos sistemas aeróbios e anaeróbios, citados por Von Sperling e Andreoli (2001)), a produção diária de lodo em 2007 teria sido de 2.500 a 3.750 toneladas. Caso 80% da população fosse atendida por coleta e tratamento de esgotos, a produção estimada de lodo seria de 14.700 a 22.000 toneladas por dia.

A maioria dos sistemas de tratamento de esgotos existentes no Brasil não contemplou o tratamento de seus resíduos. Assim, os lodos têm sido dispostos em aterros ou lixões, ou têm se acumulado nas áreas das ETE's. Embora uma das alternativas para a disposição do lodo possa ser o envio para os aterros sanitários para a co-disposição com os resíduos sólidos urbanos, a realidade de grande parte dos municípios no Brasil, não possuindo a disposição adequada de seus resíduos sólidos, como no caso do Estado de Goiás, inviabiliza essa alternativa para o setor de saneamento. Uma alternativa ambientalmente viável para o problema é a utilização do lodo na agricultura, desde que não ofereça riscos à saúde e ao meio ambiente. Para a utilização agrícola do lodo de esgoto é necessário que seus parâmetros de qualidade atendam ao disposto na resolução Conama nº375 (CONAMA, 2006). Assim, o processo de higienização para a redução de patógenos torna-se uma etapa a ser cumprida para a reciclagem agrícola do lodo.

A minimização da produção de lodos em estações de tratamento de esgotos se inicia pela escolha do tipo de tratamento dos esgotos. Os tratamentos anaeróbios se destacam

por produzir menores quantidades de lodo quando comparados aos sistemas aeróbios. Uma das tecnologias que tem sido largamente utilizada para tratamento de esgotos são os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo, denominados neste trabalho de “Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor” (UASB). Esse processo de tratamento dos esgotos, somado aos condicionantes de clima favorável, baixos custos de instalação e de operação e menor produção de lodo é uma alternativa extremamente vantajosa.

Já dentre os processos de higienização dos lodos de esgotos, a estabilização química com cal, também denominada calagem ou caleação, é uma alternativa de grande simplicidade operacional, baixos custos e viável, principalmente para pequenas quantidades de lodo. Em se tratando do uso agrícola de lodos calados, a aplicação em solos brasileiros, que em sua maioria são ácidos, necessitando de correção do pH, seria vantajosa. Estudos existentes no Brasil têm demonstrado que o tratamento do lodo por processo alcalino, com uso da cal, apresenta significativa eficiência na eliminação de patógenos, simplicidade operacional e baixos custos. A opção pelo uso da cal virgem ou hidratada vai depender das condições de disponibilidades locais, sendo que a cal hidratada possui melhores condições de manuseio, considerando o tratamento de pequenas produções de lodo com aplicação manual. Neste trabalho buscou-se avaliar os dois tipos de cal no processo de higienização.

Por fim, a alternativa de tratamento dos esgotos por meio de reatores anaeróbios (UASB) e a higienização dos lodos gerados por processo alcalino, utilizando-se a cal virgem ou hidratada, poderá se ajustar às várias situações dos municípios goianos, onde somente 19% dos municípios do Estado possuem populações maiores de 20.000 habitantes (IBGE, 2006a). Por se tratar de sistemas de pequeno e médio porte, as variáveis do tipo e volume de lodo gerado, as concentrações de cal no processo de higienização, associadas às condições favoráveis típicas de clima e solo, poderão resultar em um importante insumo agrícola para a região. Esta alternativa se torna ambientalmente mais correta que dispor os lodos em aterros sanitários, prática muitas vezes comum, principalmente por se considerar que a maioria dos municípios goianos não dispõe de aterros sanitários e convivem com eternos “lixões” à céu aberto, contaminando cursos d’água e solo.

Dentre os processos de higienização existentes, destaca-se o tratamento alcalino com a utilização da cal (denominado calagem ou estabilização química), pelo baixo custo e simplicidade operacional. Estudos realizados no Brasil têm demonstrado que essa técnica apresenta eficiência segura na eliminação de patógenos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho objetivou avaliar a eficiência da higienização alcalina do lodo de esgoto sanitário, proveniente de um reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Especificamente objetivou-se:

- Monitorar as características físico-químicas do lodo de esgoto sanitário proveniente de reator UASB (temperatura, pH, teor de umidade, sólidos voláteis e sólidos totais), submetido a diferentes doses de cal virgem e de cal hidratada, ao longo do tempo;
- Avaliar a redução das concentrações de coliformes termotolerantes e de ovos viáveis de helmintos, no lodo de esgoto sanitário proveniente de reator UASB ao longo do tempo, submetidos às diferentes doses de cal virgem e de cal hidratada;
- Identificar os processos responsáveis pelo decaimento de coliformes termotolerantes e de ovos viáveis de helmintos, na higienização alcalina do lodo de esgoto sanitário proveniente de reator UASB.
- Estimar os custos de implantação e operação de um processo simplificado de higienização de lodo com cal, com o uso de betoneira, para um sistema gerador de lodo de pequeno porte.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS

3.1.1 Caracterização da quantidade e qualidade dos esgotos sanitários

Os esgotos sanitários são os esgotos constituídos essencialmente de efluentes domésticos, de uma parcela de águas pluviais, águas de infiltração, e eventualmente de uma parcela não significativa de efluentes líquidos industriais, tendo características bem definidas (JORDÃO; PESSOA, 2005). No Brasil, utiliza-se o sistema de esgotamento sanitário do tipo separador absoluto, sendo as águas pluviais coletadas separadamente, embora seja comum a presença de águas pluviais no esgoto, indevidamente. Quanto ao aspecto quantitativo, a produção de esgotos corresponde ao consumo de água, variando ao longo do dia (variações horárias) e ao longo das semanas (variações diárias), acrescidas das vazões de infiltrações do solo, que ocorrem em tubos defeituosos, em juntas, e nas paredes dos poços de visita (VON SPERLING, 2005). A quantidade das águas de infiltração presentes nos esgotos depende do tipo de solo, profundidade do lençol freático, extensão e material da rede coletora, etc.

As características dos esgotos variam quantitativamente e qualitativamente em função dos usos às quais a água foi submetida. Esses usos, e a forma com que são exercidos, variam com o clima, situação social e econômica e hábitos da população. Os esgotos sanitários contêm cerca de 99,9% de água, sendo o restante composto de matéria em suspensão e dissolvida (em estado coloidal e em suspensão), orgânica e inorgânica, bem como microrganismos (VON SPERLING, 2005). A contribuição de esgoto doméstico no Brasil é bastante variável, situando-se na faixa de 80 a 200 L.hab⁻¹.dia⁻¹. As taxas de infiltração variam de 0,05 L.s⁻¹.km⁻¹ até 1,0 L.s⁻¹.km⁻¹, dependendo das condições locais (ALÉM SOBRINHO, 2002).

Segundo Jordão e Pessoa (2005), os parâmetros de qualidade de interesse são os relacionados às exigências legais, e às necessidades de projeto, operação e acompanhamento do desempenho de uma estação de tratamento de esgotos (ETE). Dentre os principais parâmetros relativos à qualidade, estão os sólidos (sólidos em suspensão, dissolvidos, voláteis, fixos, totais e sedimentáveis), os indicadores de matéria orgânica (oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO), o nitrogênio, fósforo e os indicadores de contaminação fecal (coliformes termotolerantes)).

Desses parâmetros, os físico-químicos encontram-se relacionados no quadro 3.1.1, com uma breve definição e faixa de concentração mais comum para os esgotos brasileiros.

Quadro 3.1.1 Principais características do esgoto sanitário.

Parâmetros de qualidade	Descrição	Valores mais comuns
Sólidos Totais (ST) (mg.L ⁻¹)	Matéria orgânica e inorgânica, suspensa e dissolvida.	400 a 1.000
Sólidos Sedimentáveis (mL.L ⁻¹ .h ⁻¹)	Parcela dos sólidos orgânicos e inorgânicos em suspensão, que sedimentam em 1 h em um cone Imhoff. Representa uma medida aproximada do lodo que é removido em um decantador primário.	2 a 20
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg.L ⁻¹)	Parcela dos sólidos orgânicos e inorgânicos que não estão dissolvidos. É a parcela não filtrável. Podem ser removidos (os sedimentáveis e os não sedimentáveis) por coagulação e filtração. Pode ser estimada uma contribuição na faixa de 50 a 60 g SST.hab ⁻¹ .dia ⁻¹ para o esgoto sanitário brasileiro, que não utiliza triturador em pias.	120 a 400
Sólidos Suspensos Fixos (SSF) (mg.L ⁻¹)	Parcela não volátil, ou mineral dos SST. Representa de 15 a 25% dos SST.	20 a 150
Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) (mg.L ⁻¹)	Parcela volátil dos SST. Representa de 75 a 85% (média de 80%) dos SST.	100 a 300
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg.L ⁻¹)	Parcela dos sólidos orgânicos e inorgânicos que é filtrável em papel de filtro de 1,2 µm.	280 a 700
Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF) (mg.L ⁻¹)	Parcela mineral, ou não volátil dos SDT.	150 a 400
Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV) (mg.L ⁻¹)	Parcela volátil dos SDT.	130 a 300
DBO (mg.L ⁻¹)	Demanda Bioquímica de Oxigênio (5 dias e 20°C). Representa a parcela biodegradável da matéria orgânica do esgoto. É uma medida do oxigênio dissolvido requerido pelos microrganismos para estabilizar a parcela de matéria orgânica que ocorre em 5 dias. ¹ .dia ⁻¹ .	120 a 450

Quadro 3.1.1 Principais características do esgoto sanitário (continuação).

Parâmetros de qualidade	Descrição	Valores mais comuns
DQO (mg.L ⁻¹)	Demanda Química de Oxigênio (5 dias e 20°C). É a quantidade de oxigênio requerido para oxidar a matéria orgânica presente no esgoto por um oxidante químico forte (dicromato de potássio em meio ácido). A contribuição média de DQO é cerca de 2 vezes a de DBO.	240 a 900
Nitrogênio Total (mg.L ⁻¹)	Nitrogênio Total inclui o nitrogênio na forma orgânica, amoniacal, nitrito e nitrato.	15 a 70
Nitrogênio Orgânico (mg.L ⁻¹)	É o Nitrogênio presente nas proteínas, aminoácidos e uréia.	6 a 28
Nitrogênio Amoniacal (mg.L ⁻¹)	É produzido como primeiro estágio da decomposição do nitrogênio orgânico.	7 a 42
NKT – Nitrogênio Kjeldahl Total (mg.L ⁻¹)	É a soma do nitrogênio nas formas orgânica e amoniacal. A contribuição de N-NKT é na faixa de 5 a 10 g.hab ⁻¹ .dia ⁻¹ . Valor típico de cidades com maior consumo de proteínas é de 8 a 9 g.hab ⁻¹ .dia ⁻¹ .	15 a 70
Nitrogênio como nitrito e nitrato (mg.L ⁻¹)	Nitrito e nitrato são formas mais oxidadas do nitrogênio. Ambas essas formas de N são ausentes em esgoto sanitário bruto. Podem aparecer em efluentes de ETE's, especialmente os nitratos, quando se tem a oxidação biológica do N amoniacal (nitrificação).	0
Fósforo Total (P) (mg.L ⁻¹)	O fósforo existe na forma orgânica e inorgânica. Fósforo em águas naturais é uma fonte para eutrofização. A contribuição estimada no Brasil é de 0,9 a 1,3 g.hab ⁻¹ .dia ⁻¹ .	2 a 10
Fósforo orgânico (mg.L ⁻¹)	É a parcela do fósforo ligado à matéria orgânica.	0,7 a 3,5
Fósforo inorgânico (mg.L ⁻¹)	Aparece nas formas de ortofosfato e polifosfato.	1,3 a 6,5
Óleos e Graxas (mg.L ⁻¹)	É a parcela da matéria orgânica que é solúvel em hexano. Suas fontes são as gorduras e óleos.	50 a 150

Fonte: Qasim (1985) apud Além Sobrinho (2002).

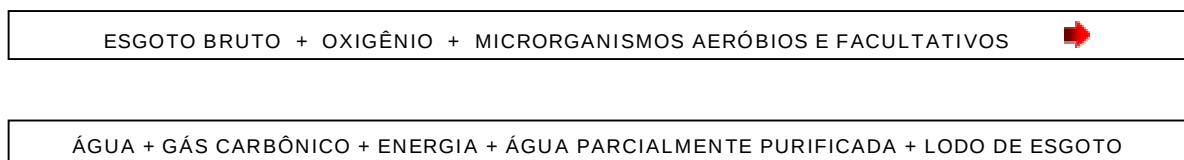
Com relação ao indicador de contaminação fecal, a concentração mais usual para os esgotos brutos é da ordem de 10^6 a 10^9 coliformes termotolerantes por 100 mL.

3.1.2 Processos de Tratamento de Esgotos Sanitários

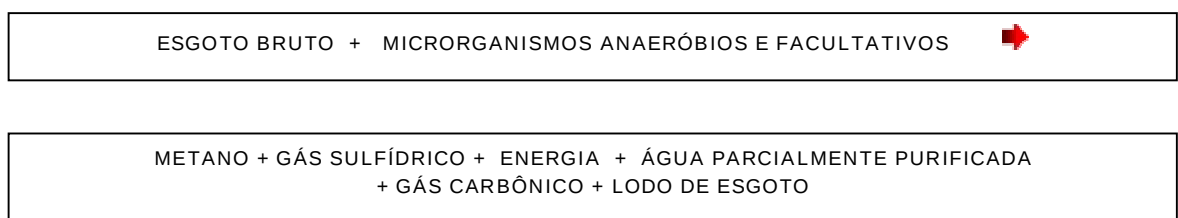
Todo sistema de esgotamento sanitário encaminha seus efluentes, direta ou indiretamente, para corpos d'água receptores, formados pelas águas de superfície ou de subsolo. Um processo de tratamento de esgotos é constituído de um conjunto de operações unitárias capazes de estabelecer um grau de condicionamento aos esgotos compatível com os parâmetros de qualidade fixados para o corpo receptor. Numa Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), essas operações unitárias são empregadas para a remoção ou transformação das substâncias indesejáveis em outras aceitáveis (JORDÃO; PESSÔA, 2005).

Segundo Aisse, Fernandes e Silva (2001) existem duas vias principais de biodegradação na natureza: a via aeróbia e a via anaeróbia:

- A biodegradação aeróbia é aquela realizada na presença de oxigênio, pelos organismos aeróbios ou facultativos. Os tratamentos aeróbios mais utilizados são as lagoas de estabilização aeróbias e facultativas e sistemas com injeção de ar (lodos ativados convencional, valos de oxidação, lodos ativados por aeração prolongada, etc.) A biodegradação aeróbia pode ser representada como:



- A biodegradação anaeróbia é aquela realizada na ausência de oxigênio, pelos microorganismos anaeróbios ou facultativos. O processo de biodegradação anaeróbia começa a ocorrer quando o oxigênio dissolvido no esgoto já foi consumido pelos microorganismos aeróbios. A biodegradação anaeróbia pode ser representada como:



O tratamento dos esgotos é usualmente classificado em níveis de tratamento associados às substâncias que são removidas. De acordo com Von Sperling (2005), os níveis de tratamento de esgotos são:

- Tratamento preliminar: remove os sólidos grosseiros;
- Tratamento primário: visa a remoção dos sólidos sedimentáveis, e consequentemente da matéria orgânica;
- Tratamento secundário: o objetivo desse nível de tratamento, onde ocorrem os mecanismos biológicos, é a redução da matéria orgânica e, eventualmente, de alguns nutrientes (nitrogênio e fósforo);
- Tratamento terciário: tem o objetivo de remover poluentes específicos, tóxicos ou compostos não biodegradáveis ou, ainda, a remoção complementar dos poluentes não removidos suficientemente no tratamento secundário.

Dentre os mecanismos para a remoção dos poluentes, encontram-se as operações físicas unitárias (gradeamento, mistura, floculação, sedimentação, flotação, filtração), os processos químicos unitários (remoção ou conversão de contaminantes pela adição de produtos químicos, por ex.: precipitação, adsorção, desinfecção) e os processos biológicos unitários em que a remoção de contaminantes ocorre por meio da atividade biológica, como exemplo: remoção da matéria orgânica carbonácea, nitrificação e desnitrificação (VON SPERLING, 2005).

A definição do tipo de tratamento de esgotos a ser implantado demanda estudos de alternativas de concepção do sistema de tratamento em função do nível de tratamento e da eficiência, necessários. O nível de tratamento requerido depende das condições de autodepuração do corpo receptor, que envolve análises de vazão mínima, capacidade de oxigenação e distâncias a jusante do ponto de lançamento dos efluentes. Segundo Von Sperling (2005), dentre os principais sistemas de tratamento de esgotos em nível secundário estão as lagoas de estabilização e suas variações, os sistemas anaeróbios, lodos ativados, reatores aeróbios com biofilmes e disposição no solo. Dentre as tecnologias citadas, não cabe aqui detalhar ou mesmo definir cada processo de tratamento. Dos tratamentos anaeróbios, os frequentemente mais utilizados são os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo, cujo processo de tratamento é descrito com maiores detalhes nesse trabalho, por se tratar do sistema gerador do lodo em estudo.

3.1.3 Sistemas de tratamento de esgotos por reatores anaeróbios

Com o trabalho pioneiro de Young e McCarty, na década de 1960, utilizando filtros anaeróbios ascendentes, ampliou-se a aplicação dos processos anaeróbios para o tratamento dos esgotos domésticos, quando até então esses tratamentos estavam destinados aos afluentes mais concentrados e materiais particulados. Na década de 1970 surgiram várias configurações de reatores anaeróbios de alta taxa, desenvolvidos para tratar efluentes líquidos industriais, como os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e os reatores com leito fluidizado (FORESTI et al., 1999).

Para os esgotos sanitários, a aplicação de reatores anaeróbios teve início na década de 80, principalmente na Holanda, Brasil, Colômbia, Índia e México (FORESTI et al., 1999). No Brasil este tipo de reator tem sido largamente utilizado e evoluído tecnologicamente. Em Curitiba, PR, foram construídos 16 reatores de 2.000 m³, conjugados em grupos de 4, compondo um único sistema para o tratamento anaeróbio dos esgotos de 600 mil pessoas. O Estado do Paraná conta com mais de 200 reatores em operação. Nos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Belém, Rio Grande do Norte, Pernambuco e Paraíba e no Distrito Federal estão em operação reatores de pequeno a grande porte, com inovações e adequações às realidades locais (NETO; CAMPOS, 1999). No Estado de Goiás, a Saneamento de Goiás (Saneago) opera 62 sistemas de tratamento de esgoto. Destes, dez sistemas possuem reatores do tipo UASB, de pequeno a médio porte.

A literatura especializada na área descreve diversas modalidades de tecnologias para os sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos, no entanto, os mais utilizados para tratar os esgotos sanitários são os do tipo UASB (*Upflow anaerobic sludge blanket*), traduzindo para o português como Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo, que também possui outras denominações: DAFA (Digestor anaeróbio de fluxo ascendente); RAFA (Reator anaeróbio de fluxo ascendente), RALF (Reator anaeróbio de leito fluidificado) e RAFAALL (Reator anaeróbio de fluxo ascendente através de leito de lodo). Segundo Chernicharo (2007) todas essas siglas apresentam impropriedades, além de não contribuírem para a difusão dessa modalidade de tratamento, causando muitas vezes a denominação incorreta dos diferentes tipos de reatores. Neste trabalho a denominação utilizada é a de origem, ou seja, “UASB”.

A microbiologia e a bioquímica nos processos anaeróbios são de fundamental importância, representando um sistema ecológico delicadamente balanceado envolvendo processos metabólicos complexos. Esses processos envolvem três grupos fisiológicos de

microrganismos com funções distintas: a) bactérias fermentativas ou acidogênicas; b) bactérias sintróficas ou acetogênicas e c) bactérias metanogênicas. Cada grupo com funções distintas. As bactérias acidogênicas convertem, por hidrólise e fermentação, os compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídios) em outros compostos mais simples, principalmente ácidos orgânicos, além de hidrogênio e dióxido de carbono. Os microrganismos acetogênicos convertem os compostos orgânicos intermediários, como proprionato e butirato, em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Por último, o acetato e o hidrogênio são convertidos em metano e dióxido de carbono pelas bactérias metanogênicas (CHERNICHARO, 2007).

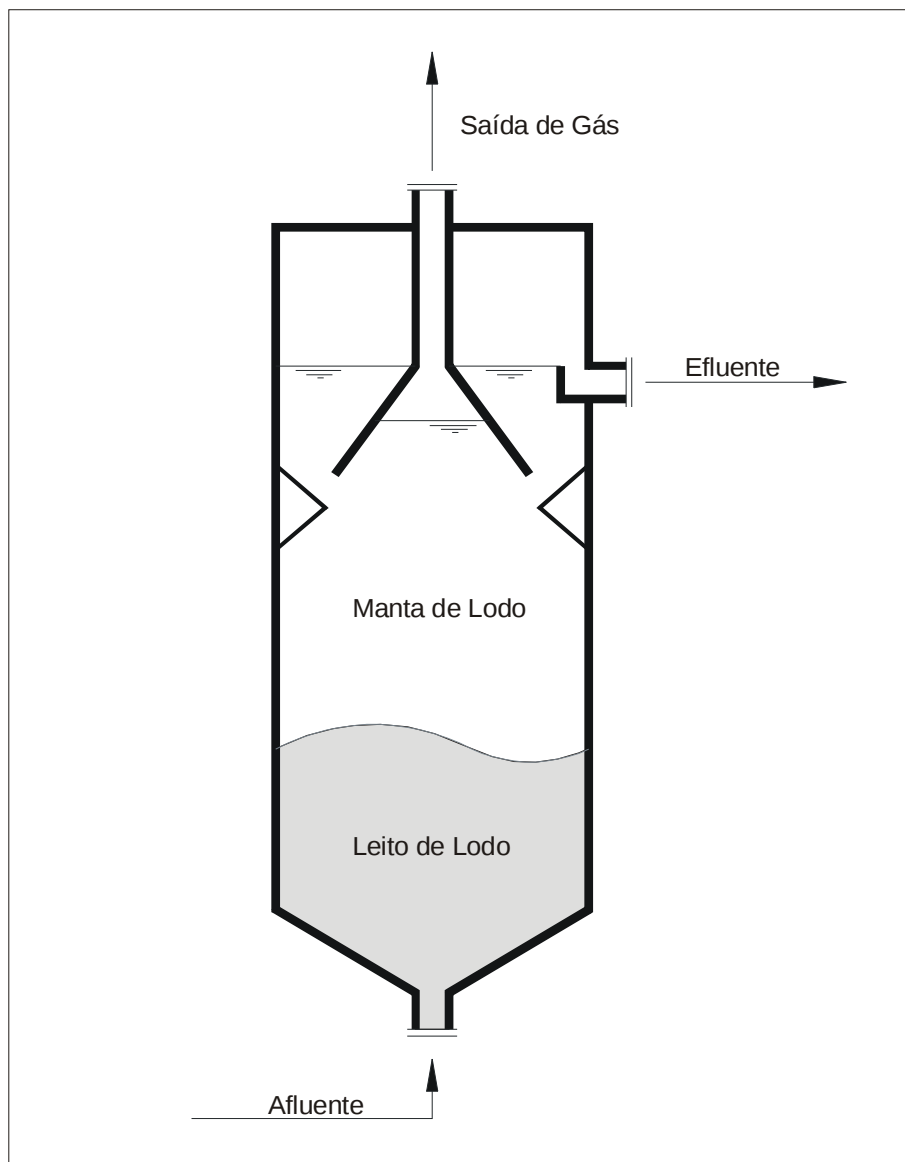
O reator UASB consiste de um tanque onde os esgotos são introduzidos na parte inferior, passando por meio de um leito de grânulos ou flocos com elevada massa de microrganismos, e vertendo pela parte superior do tanque. A figura 3.1.1 mostra um desenho esquemático de um reator do tipo UASB.

Devido às condições impostas pelo sistema, os sólidos suspensos são em grande parte retidos no reator; os microrganismos agrupam-se em flocos ou grânulos sedimentáveis formando uma camada espessa de lodo. Acima do leito de lodo se desenvolve uma zona de crescimento bacteriano mais disperso, denominada manta de lodo, onde os sólidos apresentam velocidades de sedimentação mais baixas. A remoção do substrato ocorre através de todo o leito e da manta de lodo, sendo mais pronunciada no leito de lodo. A presença de um separador trifásico (gases, sólidos e líquidos), faz com que os gases gerados não carreguem os sólidos, garantindo seu retorno. Acima do separador trifásico configura-se uma câmara de decantação onde o lodo pesado é removido da massa líquida e retornado ao compartimento de digestão, enquanto as partículas mais leves são perdidas com o efluente. Nos reatores UASB ocorre um elevado tempo de residência celular, usualmente maior que 30 dias bem superior ao tempo de detenção hidráulica, gerando um lodo excedente já estabilizado, que é descartado (CHERNICHARO, 2007).

Segundo Kato et al. (1999), pode-se considerar que em um reator anaeróbio ocorrem as operações e processos de um decantador primário, um reator biológico, um decantador secundário e um digestor de lodo, simultaneamente.

Nos processos de tratamento de esgotos por reatores UASB, assim como em qualquer outro processo, existem vantagens e desvantagens. Devido às condições climáticas favoráveis do Brasil, essa alternativa de tratamentos de esgotos assume uma posição de vanguarda. As principais limitações do processo estão relacionadas à remoção insatisfatória de nutrientes (nitrogênio e fósforo) e patógenos, além da carga residual de DBO/DQO ser

elevada, para atender aos limites de lançamentos dos efluentes em corpos hídricos preconizados pela legislação ambiental (CHERNICHARO, 2007).



Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007).

Figura 3.1.1 Desenho esquemático do reator anaeróbio do tipo UASB

Considerando esse fato, diversos são os arranjos de unidades subsequentes de pós-tratamento dos reatores anaeróbios, sendo os mais utilizados: reatores anaeróbios seguidos de lagoas de estabilização, reatores anaeróbios combinados com reatores aeróbios e reatores anaeróbios com sistema de disposição no solo.

O quadro 3.1.2 apresenta vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios de tratamento de esgotos.

Quadro 3.1.2 Principais vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios de tratamento dos esgotos.

Vantagens	Desvantagens
Baixa produção de sólidos, cerca de 2 a 8 vezes inferior à que ocorre nos processos aeróbios; Baixo consumo de energia, usualmente associado a uma elevatória de chegada. Isso faz com que os sistemas tenham custos operacionais muito baixos; Baixa demanda de área; Baixos custos de implantação, da ordem de 20 a 30 dólares <i>per capita</i>; Produção de metano, um gás combustível de elevado teor calorífero; Possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários meses; Tolerância a elevadas cargas orgânicas; Aplicabilidade em pequena e grande escala.	Remoção de nitrogênio, fósforo e patógenos insatisfatória; Produção de efluente com aspecto desagradável e usualmente com qualidade insuficiente para atender os padrões ambientais. Em decorrência, alguma forma de pós-tratamento é normalmente necessária; Possibilidade de distúrbios devido a choques de carga orgânica e hidráulica, presença de compostos tóxicos ou ausência de nutrientes; A bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e ainda precisam ser mais estudadas; A partida do processo pode ser lenta, na ausência de lodo de semeadura adaptado; Possibilidade de geração de maus odores e de problemas de corrosão, porém controláveis.

Fonte: Chernicharo e Campos (1995), Von Sperling (1995) e Lettinga et al. (1996) apud Chernicharo (2007).

3.2 GERAÇÃO, COMPOSIÇÃO E PRODUÇÃO DE LODOS

Segundo Van Haandel e Além Sobrinho (2006), os sólidos gerados nos processos de tratamento dos esgotos são:

- Os sólidos gradeados ou sólidos grosseiros retidos nas grades, representando todos os materiais que são lançados indevidamente nos esgotos;
- Os sólidos inorgânicos que são as areias e siltes, que são removidos por sedimentação;
- Material flutuante ou espuma, representando os materiais com densidades menores que a água, como óleos, graxas, plástico, papel, etc.;

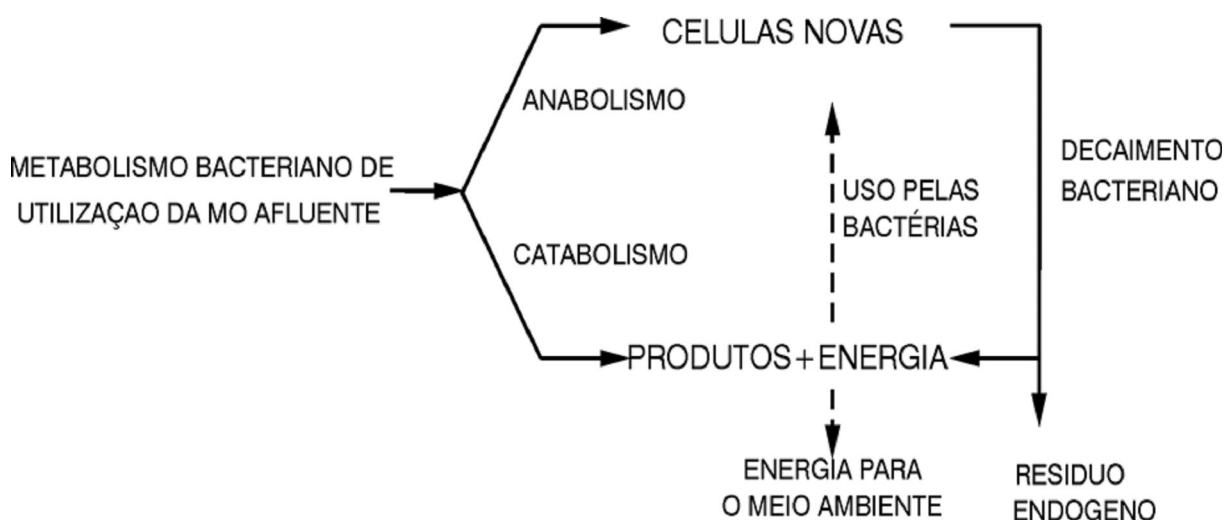
- Lodo primário e Lodo secundário, representando respectivamente os sólidos gerados por processo de tratamento primário do esgoto (material sedimentável no esgoto bruto), e por processo secundário de tratamento do esgoto, também denominado processo biológico, com alto teor de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo.

3.2.1 O metabolismo bacteriano e a geração de lodo

O processo biológico de tratamento dos esgotos está abordado neste item tendo como referência o autor Van Haandel (2008), que descreveu detalhadamente o metabolismo bacteriano com vistas a explicar a geração de lodos em processos aeróbios e anaeróbios do tratamento dos esgotos:

- No sistema de tratamento biológico de esgotos, ocorre a degradação da matéria orgânica pelas bactérias heterotróficas que a utilizam como fonte material e também como fonte de energia. Quando as bactérias usam a matéria orgânica como fonte material, esse processo é chamado de anabolismo ou assimilação, e a matéria orgânica é transformada em massa celular. Esse processo não ocorre espontaneamente, depende de energia química para as bactérias. Essa energia é suprida quando as bactérias transformam a matéria orgânica em produtos estabilizados, acontecendo aí o processo denominado de catabolismo ou desassimilação. No metabolismo bacteriano, ocorre a perda de massa celular pelo decaimento bacteriano. Em sistemas aeróbios esse decaimento se desenvolve com uma taxa de 1% por hora, dependendo da temperatura, enquanto nos sistemas anaeróbios é bastante lento. No metabolismo aeróbio, a oxidação da massa celular se chama respiração endógena e a oxidação da matéria orgânica extracelular, respiração exógena. A parte da massa bacteriana decaída, não biodegradável (não oxidada) se chama resíduo endógeno, acumulando-se no sistema de tratamento. A figura 3.2.1 mostra esquematicamente a relação entre o catabolismo e o anabolismo.
- Segundo Van Haandel e Lettinga (1994 apud VAN HAANDEL, 2008), no catabolismo distinguem-se dois processos fundamentalmente diferentes: o processo oxidativo e o fermentativo. No processo oxidativo o material

orgânico reage com um oxidante extracelular presente no sistema de tratamento. Os produtos da oxidação do material orgânico são compostos inorgânicos estáveis, principalmente dióxido de carbono e água. Os oxidantes naturalmente encontrados em sistemas biológicos de tratamento de esgotos são: o oxigênio, nitrato e sulfato. No catabolismo oxidativo a quantidade de energia é grande, da ordem de $13,8 \text{ kJ.g}^{-1} \text{ DQO}$.



Fonte: Van Haandel e Além Sobrinho (2006).

Figura 3.2.1 Representação esquemática do metabolismo de bactérias heterotróficas

- A quantidade de matéria orgânica utilizada nos processos anabólico e catabólico, depende da quantidade de energia liberada no catabolismo e da taxa de decaimento bacteriano. A energia disponível para o anabolismo é maior para as bactérias que usam o catabolismo oxidativo (bactérias aeróbias) que para as bactérias fermentativas (bactérias anaeróbias) porque, neste último, grande parte da energia química, originalmente presente na matéria orgânica fermentada, permanece contida no metano. Com a maior disponibilidade de energia nos processos aeróbios de tratamento, a atividade anabólica será maior que nos sistemas anaeróbios.
- Os processos do metabolismo bacteriano em sistemas de tratamento resultam numa divisão em três frações do material orgânico do afluente: a) uma parte é anabolizada e transformada em lodo, b) uma parte é catabolizada e transformada em produtos estáveis geralmente gasosos e c) outra parte do material orgânico não é metabolizada e acaba descarregada no efluente. No caso de sistemas de tratamento aeróbio existem expressões que permitem

calcular o valor das frações de material orgânico e, portanto estimar a divisão do material orgânico em fração transformada em lodo, fração catabolizada (oxidada) e fração no efluente, em função das frações não biodegradáveis solúveis e particuladas, da temperatura e da idade de lodo, que é o tempo de permanência dos sólidos no sistema de tratamento. Para os sistemas de tratamento anaeróbios ainda não foi possível desenvolver as mesmas expressões da divisão do material orgânico afluente.

- Partindo de um modelo empírico que permitiu calcular as frações de matéria orgânica em forma de DQO que poderia ser transformada em metano, pela digestão do lodo, Van Haandel e Marais (1999 apud VAN HAANDEL, 2008) concluiu que:
 - o Em sistemas aeróbios a remoção do material orgânico é eficiente até para uma idade de lodo curta (3 dias) enquanto que em sistemas anaeróbios a eficiência só é essencialmente completa quando a idade do lodo é longa (>100 dias a 25°C). Isto demonstra a importância de retenção de lodo no sistema de tratamento, para diminuir a parcela biodegradável presente no lodo e no efluente. Na prática pode não ser viável economicamente operar um sistema de tratamento anaeróbio a uma idade de lodo muito longa. Neste caso a remoção da matéria orgânica será apenas parcial, com presença de matéria biodegradável no efluente e no lodo de excesso do sistema;
 - o Em sistemas aeróbios a parcela de matéria orgânica presente no lodo é de 25% a 40%, enquanto nos sistemas anaeróbios é de 15% a 25%;
 - o Sistemas aeróbios tendem a produzir bem mais lodo e este lodo é instável podendo ser digerido. Dependendo da idade de lodo a energia gerada pela digestão de lodo pode ser suficiente para tornar o sistema de tratamento independente de energia externa: a energia elétrica gerada a partir do metano do lodo poderá atender a demanda de energia para aeração, bombeamento;
 - o Nos sistemas anaeróbios a fração biológica (a massa bacteriana) é uma fração relativamente pequena do lodo; frações maiores são o lodo inerte (gerado a partir do material orgânico não biodegradável e particulado) e, dependendo da idade do lodo, o material biodegradável particulado floculado.

3.2.2 Composição dos lodos de esgotos

O conhecimento da composição físico-química dos lodos, incluindo nutrientes, é fundamental para a definição do tipo de disposição final (METCALF; EDDY, 1991). Os valores típicos dos principais constituintes do lodo estão apresentados no quadro 3.2.1.

Com relação aos constituintes do lodo, de interesse agrônômico, fonte de nutrientes para as plantas, os quadros 3.2.2 a 3.2.4 apresentam comparativos com as concentrações de diversos elementos presentes em fertilizantes comerciais e em esterco animais (COMPARINI, 2001).

Quadro 3.2.1 Composição química típica de lodos crus e lodos digeridos.

Constituinte	Lodos primários não tratados		Lodos primários digeridos		Lodos ativados
	Faixa	Típico	Faixa	Típico	Faixa
Sólidos Totais (%ST)	2,0-8,0	5,0	6,0-12,0	10,0	0,8-1,2
Sólidos Voláteis (%ST)	60-80	65	30-60	40	59-88
Gorduras e Graxas (%ST)					
Éteres solúveis	6-30	-	5-20	18,0	-
Éteres extraíveis	7-35	-	-	-	5-12
Proteínas (%ST)	20-30	25	15-20	18,0	32-41
Nitrogênio (N.%ST)	1,5-4,0	2,5	1,6-6,0	3,0	2,4-5,0
Fósforo (P ₂ O ₅ .%ST)	0,8-2,8	1,6	1,5-4,0	2,5	2,8-11,0
Potássio (K ₂ O.%ST)	0-1,0	0,4	0,0-3,0	1,0	0,5-0,7
Celulose (%ST)	8,0-15,0	10,0	8,0-15,0	10,0	-

Fonte: Adaptado de Metcalf e Eddy (1991).

Quadro 3.2.2 Comparação do nível de nutrientes em fertilizantes comerciais e lodos de esgotos.

Produto	Nutrientes (%)		
	N	P	K
Fertilizantes para uso agrícola – típico ⁽¹⁾	5	10	10
Lodo de esgotos estabilizados – valores típicos	3,3	2,3	0,3

Fonte: Metcalf e Eddy (1991).

⁽¹⁾ A concentração de nutrientes pode variar largamente dependendo do solo e necessidade da planta.

Quadro 3.2.3 Composição de alguns adubos orgânicos em relação aos macronutrientes das plantas

Resíduo	N	P	K	Ca	Mg	S
	g.kg ⁻¹ (base seca)					
Esterco de curral	17,3	2,0	8,5	5,5	3,9	0,2
Composto de lixo	12,3	2,8	8,0	25,1	3,4	nd ⁽²⁾
Vinhaça	0,31	0,11	3,6	0,79	0,27	0,92
Cama de frango de corte	27,7	16,7	25,7	23,7	6,0	nd ⁽²⁾
Lodo de esgoto ⁽¹⁾	79,1	10,6	0,63	22,1	2,1	nd ⁽²⁾

Fonte: Melo e Marques (2000) apud Comparini (2001).

⁽¹⁾ Média de duas amostras de lodo da ETE de Franca – SP.

⁽²⁾ Não determinado.

Quadro 3.2.4 Composição de alguns adubos orgânicos em relação aos micronutrientes das plantas

Resíduo	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
	g.kg ⁻¹ (base seca)					
Esterco de curral	nd ⁽²⁾	160	7.336	552	16	128
Composto de lixo	1,0	229	23.325	304	22	340
Cama de frango de corte	nd ⁽²⁾	nd ⁽²⁾	nd ⁽²⁾	360	nd ⁽²⁾	280
Lodo de esgoto ⁽¹⁾	118	98,0	42.224	242	9,2	1.868

Fonte: Metcalf e Eddy (1991) apud Comparini (2001).

⁽¹⁾ Média de duas amostras de lodo da ETE de Franca – SP.

⁽²⁾ Não determinado.

Na composição do lodo de esgoto encontram-se também substâncias contaminantes como os microorganismos patógenos, os metais pesados e os poluentes orgânicos variados. A presença desses contaminantes no lodo está diretamente ligada ao esgoto bruto e aos processos de tratamento adotados. O esgoto produzido por uma população saudável conterá menos patógenos, da mesma forma que um esgoto predominantemente doméstico apresenta baixas concentrações de metais pesados (SILVA et al., 2001). No esgoto, a presença de metais está associada aos despejos das seguintes indústrias: galvanoplastias, outras indústrias químicas (formulação de compostos orgânicos, curtumes, indústrias farmacêuticas), indústrias metálicas (fundições), indústrias químicas (formulação de compostos inorgânicos, lavanderias, indústria de petróleo, formulação de corantes e pigmentos) (VON SPERLING, 2005).

A seguir estão relacionados, com um breve comentário, conforme relatado por Silva et al. (2001), os principais contaminantes do lodo de esgoto:

- Microrganismos patógenos: os agentes patógenos presentes no lodo são os helmintos, protozoários, fungos, vírus e bactérias. Estudos epidemiológicos têm demonstrado que esses agentes representam riscos para a saúde humana e animal. Esses riscos são devidos à alta frequência de parasitismo encontrada na população em diferentes partes do mundo, ao longo tempo de sobrevivência no meio externo para os helmintos (ovos de *Ascaris sp.* podem sobreviver até sete anos) e devido à dose infectante (um ovo ou cisto é suficiente para infectar o hospedeiro);
- Metais pesados: os principais metais pesados encontrados nos lodos de esgoto são: cádmio, cobre, zinco, níquel, mercúrio, cromo, chumbo, arsênio e selênio. As concentrações de metais pesados possíveis de serem encontradas no lodo são bastante variáveis e dependem do esgoto bruto afluente à ETE. O recebimento de esgotos de características não domésticas em coletores públicos deve ser proibido pelas concessionárias prestadoras dos serviços de saneamento, visando a reciclagem do lodo gerado em seus sistemas de tratamento, uma vez que toda a responsabilidade legal da disposição final dos resíduos é da empresa geradora;
- Contaminantes orgânicos: a idéia de que os compostos orgânicos perigosos estão presentes nos sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitários somente nas regiões extremamente industrializadas não é mais verdadeira. Embora, no Brasil, as análises destes compostos muitas vezes não façam parte da rotina de monitoramento, o uso de coletores públicos para lançamentos de compostos dessa natureza é uma realidade.

3.2.3 Produção de lodos

Todos os processos de tratamento de esgotos geram lodos e, em todos os sistemas é necessário o descarte desse lodo. Alguns sistemas armazenam lodo por um período maior (vários anos), ou mesmo por todo o horizonte de operação da ETE, como nas lagoas de estabilização. Nessas unidades, dependendo do tipo de lagoa adotado, o lodo deve ser retirado periodicamente, ou apenas no final do horizonte de projeto, normalmente de vinte anos,

quando a lagoa atinge seu limite de sólidos sedimentados e necessita da remoção do lodo para continuar operando com a eficiência desejada. Outros sistemas necessitam de um descarte de lodo periódico ou mesmo contínuo, como no caso dos reatores anaeróbios e dos lodos ativados (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001).

A quantidade de lodo muitas vezes é medida em toneladas de massa seca de lodo (MS) por dia. O teor de sólidos, ou, em contraposição, a umidade, é a característica física do lodo que está diretamente relacionada com o uso e disposição. Quanto maior o teor de sólidos, menores as quantidades a serem armazenadas, transportadas ou dispostas. Lodos em forma líquida, com teores de sólidos em torno de 10%, podem ser transportados por tubulações ou em caminhões tanque. Lodos desaguados com teores de sólidos acima de 20%, podem ser transportados em caminhões do tipo caçamba (COMPARINI, 2001).

Segundo Van Haandel e Lettinga (1994 apud VON SPERLING; GONÇALVES, 2001), a umidade influi nas propriedades mecânicas do lodo e consequentemente na forma de disposição final, que depende da consistência do lodo, cujas relações estão citadas no quadro 3.2.5.

Quadro 3.2.5 Relação entre o teor de sólidos secos, a umidade e a consistência do lodo.

Teor de sólidos secos (%)	Umidade (%)	Consistência do lodo
0 a 25	75 a 100	Lodo fluido
25 a 35	65 a 75	Torta semi-sólida
35 a 60	40 a 65	Sólido duro
60 a 85	15 a 40	Lodo em grânulos
85 a 100	0 a 15	Lodo desintegrado em pó fino

Fonte: Von Sperling e Gonçalves (2001).

Segundo Aisse, Fernandes e Silva (2001), os fatores que afetam a quantidade de lodo produzido por um sistema de tratamento de esgoto são:

- Vazão e carga orgânica do esgoto a ser tratado e eficiência do sistema de tratamento;
- Tipo de tratamento utilizado: no tratamento biológico o metabolismo bacteriano é determinante na produção de lodos. Sistemas aeróbios, em que a

maior parte do substrato orgânico é incorporado à massa celular das bactérias, a produção de lodo é maior comparada aos sistemas anaeróbios, onde o metabolismo metanogênico transforma quase toda a matéria orgânica em produtos estáveis, produzindo menos lodo;

- Tipo de processamento do lodo: o teor de sólidos é o fator mais importante relativo aos volumes de lodos. As etapas de adensamento e desidratação reduzem o volume de lodo em mais de 50% do seu volume inicial, cada uma. Os processos de estabilização química e a compostagem aumentam o volume do lodo a ser disposto e a secagem térmica reduz o volume pela perda da água.

Em Goiás, as estações de tratamento de esgotos (ETE's) do tipo UASB atualmente em operação pela Saneago estão apresentadas no quadro 3.2.6.

Quadro 3.2.6 Capacidade e produção de lodo dos sistemas de tratamento de esgotos do tipo UASB, operados pela Saneago.

ETE / Município / Tipo de Tratamento ⁽¹⁾	Capacidade Instalada da ETE (hab.)	População Atendida Atual (hab.)	Produção Atual de Lodo (m³. mês⁻¹)	Produção ⁽²⁾ Futura de Lodo (m³.mês⁻¹)
ETE Lages - Aparecida de Goiânia	55.402	16.283	29	50
ETE Campos Dourados - Goiânia / UASB seguido de Biofiltro aerado	2.000	600	1	2
ETE Itumbiara	78.822	65.894	60	71
ETE Quirinópolis	47.250	33.778	30	42
ETE Ceres	20.430	8.713	10	18
ETE Planaltina de Goiás	25.178	13.832	15	22
ETE Posse	23.250	15.602	15	21
ETE Britânia	2.946	1.235	1	3
ETE Santa Helena	35.103	Em início de operação	-	32
ETE São João da Paraúna	1.748	1.248	1	1
TOTAL	255.278	155.937	162	262

Fonte: Informações das Superintendências Metropolitana de Negócios e de Serviços do Interior da Saneago.

⁽¹⁾ onde não citado o tipo de tratamento, corresponde ao tipo UASB seguido de lagoas.

⁽²⁾ valores estimados segundo a taxa de 0,03 L.hab⁻¹.dia⁻¹, atendendo à capacidade instalada da ETE.

A produção estimada de lodo descartado da fase líquida dos sistemas UASB é de 0,2 a 0,6 L.hab⁻¹.dia⁻¹, correspondendo a 12 a 18 g SS. hab⁻¹.dia⁻¹ representando um volume de 0,03 a 0,06 L.hab⁻¹.dia⁻¹ de lodo desaguado com teor de sólidos entre 30% a 45%, considerando a densidade do lodo seco de 1.000 kg.m⁻³ (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001). Nos reatores anaeróbios do tipo UASB, o descarte de lodo é feito periodicamente. O tempo médio de residência celular (idade do lodo) é geralmente superior a 30 dias, propiciando a estabilização. A acumulação de sólidos deve-se à presença de precipitados minerais além da produção de biomassa (CHERNICHARO, 2007).

No Estado de Goiás, o maior sistema gerador de lodo é a Estação de Tratamento de Esgotos Dr. Hélio Seixo de Brito, também denominada ETE Goiânia, que trata atualmente 1.200 L.s⁻¹. O lodo gerado é do tipo primário, estabilizado quimicamente por meio da aplicação da cal virgem na proporção de 20% de ST do lodo desaguado por centrífugas. Segundo o Relatório Operacional da ETE Goiânia do mês de março de 2008, a produção diária de lodo é cerca de 60 a 70 toneladas (SANEAGO, 2008a).

Considerando os demais sistemas geradores de lodo das ETE's operadas pela Saneago, os volumes mensais não são tão expressivos (aproximadamente 290 m³ por mês). No entanto, a disposição final desses lodos é problemática por não existir aterro sanitário adequado nas localidades, ocasionando passivos ambientais. Quanto à produção futura de lodo, a projeção é crescente, principalmente em função dos investimentos dos recursos do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) no setor de saneamento. Além disso, nos últimos dez anos foi expressivo o crescimento dos serviços de coleta e tratamento dos esgotos no Estado de Goiás, operados pela Saneago, marcado com o incremento de 37 sistemas de tratamento, e essa tendência de crescimento tem se mantido (SANEAGO, 2008b).

Adotando-se uma abordagem simplificada com relação à quantidade de lodo gerada nos processos de tratamento, pode-se expressá-la em termos *per capita* e em termos de DQO, uma vez que nos tratamentos biológicos parte da DQO removida é convertida em biomassa, que vem a constituir o lodo de esgoto. Segundo Von Sperling e Gonçalves (2001), nos processos de tratamento em que predominam mecanismos físicos de remoção de matéria orgânica não há vinculação direta entre a produção de sólidos e a remoção de DQO. Considerando que cada habitante produz 100 g de DQO por dia (0,1 kg DQO.hab⁻¹.d⁻¹) pode-se daí estimar também a contribuição de sólidos *per capita*. A quantidade e a qualidade do lodo podem variar em função das características do esgoto bruto e do sistema de tratamento a que forem submetidas. Von Sperling e Gonçalves (2001) fizeram um levantamento das

características do lodo produzido por vários sistemas de tratamento de esgotos, baseados em dados de diversos autores, cujo resultado é apresentado no quadro 3.2.7.

Quadro 3.2.7 Características e quantidades do lodo produzido e descartado da fase líquida em vários sistemas de tratamento de esgotos.

Sistema de Tratamento	kgSS.kg ⁻¹ de DQO aplicada	Teor de sólidos secos (%)	Massa de lodo ⁽¹⁾ (gSS.hab ⁻¹ . dia ⁻¹)	Volume de lodo ⁽²⁾ (L.hab ⁻¹ . dia ⁻¹)
Tratamento primário (convencional)	0,35-0,45	2,0-6,0	35-45	0,60-2,20
Tratamento primário (tanques sépticos)	0,20-0,30	3,0-6,0	20-30	0,30-1,00
Lagoa Facultativa	0,12-0,32	5,0-15,0	12-32	0,1-0,25
Lagoa Anaeróbia – Lagoa Facultativa				
Lagoa anaeróbia	0,20-0,45	15,0-20,0	20-45	0,10-0,30
Lagoa facultativa	0,06-0,10	7,0-12,0	6-10	0,05-0,15
Total	0,26-0,55	-	26-55	0,15-0,45
Lagoa aerada mistura completa – Lagoa Sedimentação	0,11-0,13	5,0-8,0	11-13	0,15-0,25
Tanque séptico + Filtro anaeróbio				
Tanque séptico	0,20-0,30	3,0-6,0	20-30	0,30-1,00
Filtro anaeróbio	0,07-0,09	0,5-4,0	7-9	1,20-1,80
Total	0,27-0,39	1,4-5,4	27-39	0,50-2,80
Lodos ativados convencional				
Lodo primário	0,35-0,45	2,0-6,0	35-45	0,60-2,20
Lodo secundário	0,25-0,35	0,6-1,0	25-35	2,50-6,00
Total	0,60-0,80	1,0-2,0	60-80	3,10-8,20
Lodos ativados aeração prolongada	0,50-0,55	0,8-1,2	40-45	3,30-5,60
Filtro biológico de alta carga				
Lodo primário	0,35-0,45	2,0-6,0	35-45	0,6-2,2
Lodo secundário	0,20-0,30	1,0-2,5	20-30	0,8-3,0
Total	0,55-0,75	1,5-4,0	55-75	1,4-5,2
Biofiltro aerado submerso				
Lodo primário	0,35-0,45	2,0-6,0	35-45	0,6-2,2
Lodo secundário	0,25-0,45	0,6-1,0	25-35	2,5-6,0
Total	0,60-0,80	1,0-2,0	60-80	3,1-8,2
Reator UASB	0,12-0,18	3,0-6,0	12-18	0,2-0,6
UASB + pós tratamento aeróbio ⁽³⁾				
Lodo anaeróbio (UASB)	0,12-0,18	3,0-4,0	12-18	0,3-0,6
Lodo aeróbio (lodos ativados) ⁽⁴⁾	0,08-0,14	3,0-4,0	8-14	0,2-0,5
Total	0,20-0,32	3,0-4,0	20-32	0,5-1,1

Fonte: Qasim (1985), EPA (1979,1987), Metcalf e Eddy (1991), Jordão e Pessoa (1995), Franci (1996), Aisse et al. (1999), Chernicharo (1997), Franci (1999) apud Von Sperling e Gonçalves (2001).

Nas unidades com longo tempo de detenção do lodo (ex.: lagoas, tanque séptico, reator UASB, filtro anaeróbio), os valores apresentados incluem a digestão e adensamento que ocorrem na própria unidade (os quais reduzem a massa e o volume de lodo).

⁽¹⁾ Assumindo 0,1 kgDQO.hab⁻¹.dia⁻¹ e 0,06 kgSS/hab⁻¹.dia⁻¹

⁽²⁾ Litros de lodo.hab⁻¹.dia⁻¹ = [(gSS.dia⁻¹) . (sólidos secos (%))⁻¹].x (100.1000⁻¹) (assumindo densidade de 1.000 kg.m⁻³).

⁽³⁾ Pós-tratamento aeróbio: lodos ativados, biofiltro aerado submerso, filtro biológico.

⁽⁴⁾ lodo aeróbio retirado do UASB, após redução de massa e volume na digestão e adensamento que ocorrem no próprio reator UASB (o lodo aeróbio excedente afluente ao UASB é também menor, pois neste caso a influência da perda de sólidos no efluente do decantador secundário passa a ser maior).

Na prática, a operação dos sistemas pode definir volumes de lodo um pouco diferenciados, mas as referências se mantêm por se tratar de dados estudados por diversos autores nacionais e internacionais.

Segundo Comparini (2001) a variabilidade entre as quantidades de lodos produzidos em diversos sistemas de tratamento é grande, portanto, é fundamental para a estimativa de produção de lodos o conhecimento não só do tipo de tratamento utilizado, mas também das características de operação e dos esgotos a serem tratados.

3.3 PROCESSOS DE TRATAMENTO DOS LODOS

Os diversos tratamentos possíveis para o lodo devem ser constituídos das etapas de adensamento, estabilização e desaguamento. O adensamento, que consiste na redução do volume com perda da umidade, pode se dar por adensadores de gravidade, por flotação ou centrifugação. A estabilização tem a finalidade de reduzir patógenos com a redução da concentração de sólidos voláteis, em que os processos biológicos e químicos são os mais utilizados. A última etapa é o desaguamento, com a redução do volume para melhoria das condições de manejo e facilidade de transporte. Os processos de desaguamento mais utilizados são os leitos de secagem, aplicáveis para os pequenos volumes de lodos, e os processos mecanizados (filtro prensa, prensa desaguadora, centrífugas, etc), indicados para grandes volumes de lodos gerados (JORDÃO; PESSÔA, 2005).

3.3.1 Processos de estabilização dos lodos

Segundo Luduvica (2001), os processos de estabilização têm como objetivo reduzir as concentrações de matéria orgânica e de patógenos do lodo bruto, primário ou secundário, podendo ser por meios biológicos, químicos ou térmicos:

- Estabilização biológica: realizada por meio de digestão anaeróbia ou aeróbia do lodo líquido, produzindo um lodo apto a ser utilizado com restrições na agricultura, como condicionador do solo e fertilizante orgânico. Necessita de um pós-tratamento por higienização para utilização irrestrita na agricultura e, usualmente é seguido de desaguamento para facilitar o manejo;
- Estabilização química: atingida mediante a oxidação química da matéria orgânica, com adição de produtos químicos;

- Estabilização térmica: é obtida a partir da ação do calor sobre a fração volátil em recipientes hermeticamente fechados.

3.3.2 Processos de higienização dos lodos

O processo de higienização do lodo irá garantir um menor grau de patogenicidade no lodo, reduzindo concentrações de bactérias, enterovírus e ovos viáveis de helmintos, de forma que o lodo ao ser disposto no solo, ou em qualquer alternativa de disposição final, não venha a causar riscos à saúde e ao meio ambiente. Para promover a higienização do lodo, podem-se empregar mecanismos químicos, físicos e biológicos, combinados ou isoladamente.

Segundo De Júlio (2007), embora exista um certo consenso entre vários países quanto às tecnologias de produção de um lodo seguro para aplicação irrestrita no solo, muitas das variáveis de controle do processo são distintas para cada país, em função da grande variabilidade das condições ambientais e das características do lodo produzido. Muitos dos processos utilizados na estabilização também podem ser utilizados nas etapas de higienização. Esses processos combinam mecanismos térmicos, químicos e/ou biológicos. De acordo com a abordagem de Pinto (2001), esses mecanismos são definidos sumariamente da seguinte forma:

- Via térmica: o mecanismo de redução de patógenos por via térmica combina duas variáveis de controle, relacionadas ao tempo de permanência do lodo a uma dada temperatura. Essas duas variáveis agem em conjunto para produzir a qualidade microbiológica exigida para aplicação irrestrita do lodo;
- Via química: o mecanismo de higienização de lodos pela via química utiliza um produto alcalinizante para elevar o pH do lodo, produzindo um ambiente inóspito para a sobrevivência dos microrganismos. Esse produto alcalinizante altera a natureza coloidal do protoplasma celular dos microrganismos patógenos de forma letal;
- Via biológica: a via biológica de inativação de microrganismos patógenos ainda se encontra em fase de pesquisa. A vermicultura é um exemplo cujo processo consiste na ingestão de matéria orgânica do lodo por minhocas detritívoras (*Eudrilus eugeniæ*, *Eisenia fetida* e outras) que excretam um húmus de grande valor agrônomo. Ao ingerir a matéria orgânica as minhocas

estariam também ingerindo patógenos e inativando-os por meio de sua atividade gástrica.

Ainda segundo Pinto (2001), dentre as tecnologias mais utilizadas nos processos de higienização, podem-se citar:

- Compostagem: é um processo aeróbio de decomposição da matéria orgânica, realizada por meio de condições controladas de temperatura, aeração, umidade e nutrientes. Tanto o lodo bruto quanto o digerido podem ser compostados. O produto resultante é um excelente condicionador de solos;
- Digestão aeróbia autotérmica: segue os mesmos princípios do sistema convencional de digestão aeróbia, com a diferença de operar em fase termófila;
- Calagem ou estabilização alcalina: é utilizada para tratar lodos primários, secundários ou digeridos. A cal virgem (CaO) e a cal hidratada (Ca(OH)_2) são os produtos mais utilizados.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS LODOS ANAERÓBIOS DE REATORES UASB

3.4.1 Estabilização dos lodos de reatores do tipo UASB

Conforme relatado por Chávez (1998 apud NASCIMENTO et al., 2001), a estabilização dos lodos anaeróbios ocorre tanto no material biodegradável extracelular presente no lodo (DQO exógena) como no próprio lodo (DQO endógena). Como resultado, haverá uma diminuição da concentração de SSV, caracterizando um lodo estabilizado. Durante a estabilização poderá ocorrer a redução de volume de lodo de 25% a 40%. Os parâmetros normalmente utilizados para a verificação da estabilidade do lodo são: odor, toxicidade, redução de SSV e patógenos. A fração de matéria orgânica em um lodo digerido é relativamente alta (45% a 60%), porém, trata-se de um material não biodegradável ou de difícil biodegradação, reduzindo problemas ao meio ambiente quanto à formação de maus odores e atração de vetores disseminadores de doenças (NASCIMENTO et al., 2001).

Segundo Chernicharo (2007), as características dos lodos anaeróbios provenientes de reatores UASB são:

- Lodo estabilizado, devido ao elevado tempo de residência celular no sistema de tratamento, possibilitando a desidratação posterior sem a necessidade de tratamento prévio;
- Concentração de sólidos de 3% a 5%, possibilitando o descarte de menores volumes de lodo;
- Facilidade de desaguamento;
- Possibilidade de reciclagem agrícola do lodo, desde que tomados os devidos cuidados com relação aos patógenos.

A composição do lodo dos reatores UASB pode variar em função da periodicidade das descargas, todavia, é um lodo mais mineralizado, com menor teor de matéria orgânica e nutrientes e umidade variável (ANDREOLI et al., 1997).

Dentre as principais características físicas e químicas dos lodos gerados em reatores UASB, encontram-se: pH de 6,5, teor de umidade em torno de 96%, 2,3% de nitrogênio e 0,95% de fósforo (ANDREOLI; FERNANDES, 1999 apud SOARES; MATOS; BERNARDES, 2001).

A produção de lodo em um sistema anaeróbio é menor devido ao baixo crescimento das bactérias anaeróbias e à forma de conversão da matéria orgânica, conforme já comentado no item 3.2.1 deste trabalho. De acordo com dados compilados por Aisse et al. (1999 apud SOARES; MATOS; BERNARDES, 2001), estima-se que a taxa de produção média de lodo gerado em um reator UASB seja de $16 \text{ g STS.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$, enquanto o volume diário de lodo se encontra em torno de $0,25 \text{ L.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$. Esses dados indicam que a concentração de lodo em excesso do reator UASB não será inferior a 50 g.L^{-1} . De acordo com os mesmos autores, o lodo de descarte pode ser diretamente encaminhado para a unidade de secagem, pois possui elevado grau de estabilização, alta concentração de sólidos e reduzido volume.

3.4.2 Desaguamento de lodos anaeróbios de reatores UASB

O desaguamento dos lodos pode ser feito por meio mecanizado ou natural. Os processos naturais de desaguamento se baseiam no escoamento da água livre e, sobretudo, na evaporação da água, para gerar uma torta de lodo com elevados teores de sólidos totais. Somente a drenagem da água livre, que ocorre em poucas horas, pode elevar a concentração de sólidos totais de 2% a 4% no lodo de descarte, até concentrações superiores a 15% ST na

torta (WANKE et al., 2003). O lodo quando bem digerido, ou seja, com pequenas concentrações de sólidos biodegradáveis, apresenta características satisfatórias para que o desaguamento ocorra num período mais curto de tempo (JORDÃO; PESSOA, 2005). Segundo Ponsen e Rooijmans (1987 apud SOARES; MATOS; BERNARDES, 2001), nos lodos não estabilizados, a secagem ocorre lentamente, apresentando problemas de maus odores e proliferação de insetos.

Os leitos de secagem constituem um processo de desaguamento natural de baixo custo e facilidade operacional, adequado ao clima do Brasil, especialmente da região Centro-Oeste, e aos lodos oriundos de reatores UASB. Segundo Barros et al. (2005), os lodos de reatores anaeróbios se adaptam muito bem ao desaguamento em leitos de secagem; a biomassa fica retida mais tempo no sistema, onde ocorre a digestão anaeróbia do próprio material celular. O resultado disso é um lodo com menor teor de matéria orgânica (lodo digerido) e maior concentração de sólidos inorgânicos, o que dispensa uma etapa posterior de digestão.

A água presente no lodo está distribuída em quatro formas distintas: água livre, removida por ação gravitacional ou por flotação; água adsorvida e água capilar, que são removidas por forças maiores, de origem química, quando se usam flocculantes, ou mecânicas, quando se usam processos mecanizados (centrífugas, filtro prensa); e a água celular, que é removida por forças térmicas, como a evaporação (GONÇALVES; LUDUVIC; VON SPERLING, 2001).

Com relação à incidência das águas de precipitações pluviométricas, o lodo tende a passar novamente por todo o processo de secagem. No entanto, não existe uma relação direta com o volume de água precipitada e, sim, ao ganho de umidade do lodo. Conforme enfatizado por Van Haandel e Lettinga (1994 apud SOARES; MATOS; BERNARDES, 2001), a precipitação não é removida com a mesma taxa que a água do lodo; assim, grande parte do volume de água precipitado percola rapidamente pelo leito, não se distribuindo no lodo.

Os mesmos autores, ao pesquisar o processo de desaguamento de lodos anaeróbios oriundos de reatores UASB, obtiveram resultados que permitiram relatar as seguintes observações:

- No processo de secagem, que antecede ao aparecimento de gretas, a camada superficial seca passa a formar uma barreira, impedindo a incidência de radiação e limitando a evaporação da água do lodo na camada inferior.

Verificou-se esse fato mediante dois resultados de umidade distintos (55% e 76%) de um mesmo leito de secagem;

- Quando ocorre o fenômeno do gretamento, produzido pela resistência à contração ou diminuição do volume da camada inferior, aumenta-se significativamente a área exposta ao ar livre, permitindo maior evaporação. Essa etapa é responsável pela rapidez e pelo completo desenvolvimento do processo de secagem;
- A análise de secagem do lodo permitiu determinar o teor de umidade de 80% como a capacidade de campo do lodo, caracterizando, neste ponto, o momento em que a drenagem para de influir e a evaporação passa a ser o fenômeno dominante.

Pesquisa desenvolvida por Barros et al. (2005) indicou que o pH do lodo é reduzido com o desaguamento. Os autores sugerem que isto pode estar relacionado com fatores ambientais relativos à exposição dos lodos nos leitos de secagem, que causam perda de água. Os mesmos autores relatam que, no processo de secagem, ocorre a decomposição da matéria orgânica, sendo formados os ácidos orgânicos e liberados os cátions (K, Ca, Na, Mg e OH), que dão um caráter básico ao lodo e são lixiviados com a água, contribuindo assim para o decaimento do pH do lodo seco. A mesma pesquisa demonstrou que a perda d'água causou um aumento na condutividade elétrica e nos sólidos totais fixos e, conseqüente redução dos sólidos totais voláteis. Promoveu, também, a estabilização adicional da matéria orgânica quando a permanência no leito de secagem se deu por um período prolongado (20 dias) em temperaturas ambientes de 24°C a 36°C. Com relação aos nutrientes, com o desaguamento houve perda de potássio e nitrogênio, relacionada com a perda de água, e aumentos dos teores de sulfato e fósforo, provavelmente porque estes elementos já se encontravam na fase sólida e a secagem do lodo eleva o teor de sólidos.

3.5 HIGIENIZAÇÃO DOS LODOS POR PROCESSO ALCALINO

A higienização dos lodos por processo alcalino, denominado calagem, caleação ou estabilização química ou alcalina, consiste na utilização de um produto alcalino para elevar o pH do lodo. Segundo Tsutiya (2002), a cal é um dos produtos alcalinos de menor custo mais utilizados em saneamento. A eliminação de patógenos se dá por efeito da elevação do pH a níveis superiores a 12.

A estabilização alcalina tem a propriedade de elevar o pH e a temperatura e produzir NH_3 . O NH_3 inativa e destrói os ovos de helmintos, penetrando no seu interior e desnaturando as enzimas responsáveis pelo metabolismo do organismo, provocando a sua morte (MENDES, 2003 apud BARROS; COSTA; ANDREOLI; 2006).

O controle sanitário do lodo de esgoto é o principal objetivo do processo de higienização. Segundo estudos da agência norte americana de proteção ambiental, United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2003), o tempo de sobrevivência máximo comum em patógenos no solo é de 75 dias para bactérias, 12 dias para vírus, 8 dias para protozoários e dois anos (podendo chegar a 7 anos) para helmintos. Segundo os mesmos autores, diferenças regionais nos quadros sanitário, ambiental e sócio-econômico inviabilizam a transferência de um modelo de monitoramento sanitário dos países desenvolvidos para o Brasil.

3.5.1 Microrganismos patógenos presentes no lodo de esgoto

As espécies e quantidades de patógenos presentes no esgoto doméstico e no lodo produzido dependem da saúde da população geradora do esgoto, podendo variar ao longo do tempo. O nível de patógenos presente no lodo também depende da redução alcançada no processo de tratamento. Destacam-se os seguintes grupos de patógenos presentes no lodo de esgoto: vírus, bactérias, protozoários e helmintos. As características dos principais patógenos de cada grupo e as doenças associadas a eles estão descritas a seguir.

- Vírus

Os vírus podem infectar todas as formas de vida, podendo ser transmitidos por meio do solo, alimentos, água, aerossóis ou da poeira (SILVA et al., 2001). Os principais tipos de vírus que podem estar presentes nos lodos de esgotos estão apresentados no quadro 3.5.1.

A sobrevivência de vírus nos esgotos tem sido investigada em muitos estudos, com os resultados indicando tempos maiores do que em águas de rios, com valores acima de 231 dias em baixas temperaturas ($<10^\circ \text{C}$), e de até 110 dias em temperaturas mais elevadas (20°C) (FEACHEM et al., 1983 apud COMPARINI, 2001).

Quadro 3.5.1 Principais vírus entéricos que podem estar presentes em lodos de esgotos domésticos, as doenças a eles associadas e seus hospedeiros.

Vírus Entéricos	Doença ou sintoma	Hospedeiro
Enterovírus Poliovírus Coxsackievírus A e B Echovírus	Poliomelite, meningite e febre Meningite, pneumonia, miocardites Meningite, paralisia, irritação da pele, doenças respiratórias diarreias e febre	Homem Homem Homem
Vírus da Hepatite A	Hepatite infecciosa	Homem
Reovírus	Infecções respiratórias, gastroenterite	Homem
Rotavírus	Gastroenterite aguda, vômitos e diarreias	Homem e animais
Astrovírus	Gastroenterites	Homem
Calcivírus	Gastroenterites, febre e diarreias	Homem

Fontes: Adaptado de USEPA(2003) e Comparini (2001).

- Bactérias

As bactérias são os microrganismos mais frágeis aos processos de tratamento de lodo e a sua incidência é reduzida pela radiação solar e desaguamento do lodo (BONNET; LARA; DOMASZAK, 2000). As bactérias presentes no lodo são de diferentes origens, como da flora intestinal humana e animal, do solo, do ar e da água (SILVA et al. 2001). A transmissão dá-se por via oral-fecal, pela água e pelos alimentos. O quadro 3.5.2 apresenta o principal grupo de bactérias patogênicas de maior interesse, que representam riscos à saúde humana e animal.

Em experimentos realizados no Paraná (SANEPAR, 1997 apud BONNET; LARA; DOMASZAK, 2000) a *Salmonella spp.* foi detectada em lodo digerido aeróbio, sendo eliminada imediatamente após a incorporação do lodo no solo, sem qualquer tratamento químico ou térmico. Os autores ponderaram que a eliminação deveu-se à competição com microrganismos autóctones (nativos) do solo. No entanto, o mesmo experimento detectou a presença do microrganismo após de 13 dias até 28 dias da incorporação, denotando a recuperação de sua população em consequência principalmente de baixas temperaturas nos meses de inverno. Segundo os mesmos autores, o tratamento com calagem a 50% de peso seco mostrou-se 100% eficaz na eliminação de *Salmonella spp.*, independentemente do período de contato. Estudos demonstrados por FEACHEM et al. (1983 apud COMPARINI, 2001) registraram que a sobrevivência em solos por vários meses depende da temperatura, luz

solar, pH e conteúdo de matéria orgânica. O tempo máximo de sobrevivência para *Salmonella* spp. em climas quentes e ensolarados foi de cerca de 2 meses, com a quase completa eliminação em duas semanas.

Quadro 3.5.2 Principais bactérias entéricas que podem estar presentes em lodos de esgotos domésticos, as doenças a elas associadas e seus hospedeiros.

Bactéria	Doença	Hospedeiro
<i>Salmonella paratyphi</i>	Febre paratifoide	Mamíferos domésticos e selvagens, pássaros e tartarugas
<i>Salmonella typhi</i>	Febre tifóide	Mamíferos, aves domésticas e selvagens
<i>Salmonella</i> spp.	Salmonelose	Bovinos e outros animais
<i>Shigella</i>	Disenteria	-
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera	-
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Gastroenterite	Aves domésticas e silvestres e mamíferos
<i>Campylobacter</i>	Gastroenterites	Animais domésticos, cachorros, gatos, aves
<i>Escherichia coli</i>	Gastroenterites	Animais domésticos
<i>Lepstospira</i> spp.	Lepstopirose	Mamíferos domésticos e selvagens, ratos

Fonte: Adaptado de USEPA(2003) e ADEME (1998) apud Silva et al. (2001).

Estudos realizados no Brasil, por Martins et al. (1986 apud BONNET; LARA e DOMASZAK, 2000), apontaram a ausência da *Salmonella* spp., como excelente indicador para o estudo de descontaminação de lodo por sua resistência a tratamentos e pressões de sobrevivência no meio ambiente. Os autores encontraram grande variabilidade nos teores de *Salmonella* spp. em lodo digerido, mas pouca incidência em lodo após condicionamento químico. Quando a alcalinização por tratamento químico atingiu pH 12, houve eliminação da bactéria.

A bactéria *Shigella* sp. ocorre apenas no homem e está relacionada às condições precárias de saneamento. Essa bactéria tem dose infectiva menor que a *Salmonella* spp. e tende a sobreviver pouco no meio ambiente (BONNET; LARA; DOMASZAK, 2000).

Resultados de pesquisas apresentados por Moscalewski et al. (1996 apud BONNET; LARA; DOMASZAK, 2000) mostraram que a calagem é eficiente na eliminação do *Vibrio cholerae*. Em Amostras de lodo digerido aeróbio inoculado com o vibrião colérico, após calagem a 40% e 50% do peso seco, foram encontrados vibriões apenas no primeiro dia verificando-se a ausência de recuperação de crescimento.

Segundo Comparini (2001), a presença do gênero *Yersinia* nos esgotos foi relatada por diversos autores, entretanto, não se tem informações de sua presença em lodos de esgotos de estações de tratamento.

Existem poucos dados sobre as bactérias *Campylobacter* no ambiente e, segundo Bitton (1994 apud COMPARINI, 2001), essa bactéria tem sido detectada em esgotos, mas não em lodos de esgotos digeridos.

As *Escherichia coli* são habitantes normais dos intestinos do homem e de muitas outras espécies animais, sendo sua ocorrência no ambiente pouco conhecida. A sobrevivência dessa bactéria nos esgotos é prolongada em baixas temperaturas e, quando acima de 25°C, ocorre mais de 99% de redução em um período de 10 a 15 dias (COMPARINI, 2001). Já a sobrevivência nos solos varia largamente em função da temperatura e da luz solar. O autor relata que para a redução 90% de *Escherichia coli*, os períodos de tempo variam de 3 dias no verão, a um máximo de 14 dias no outono e inverno, em locais sombreados.

Lepstopira é sensível ao estresse ambiental e não sobrevive bem nos solos. São resistentes à desinfecção de lodos ou à inativação pelo ambiente podendo persistir por muitos meses em efluentes de estações de tratamento em baixas temperaturas e alta concentração de matéria orgânica (USEPA, 1985; EPS, 1984 apud BONNET; LARA; DOMASZAK, 2000).

- Protozoários

Conforme relatado em pesquisas desenvolvidas no Paraná, em lodos digeridos anaeróbios de alguns reatores, foram detectadas as presenças de *Isospora sp.*, *Entamoeba coli*, *Giardia lamblia*, *Endolimax nana* e *Entamoeba histolytica*, sendo esta última a mais frequente nas amostras. Nenhum cisto de protozoário foi encontrado em lodo digerido aeróbio da ETE Belém, em Curitiba (BONNET; LARA; DOMASZAK, 2000). O quadro 3.5.3 apresenta os principais tipos de protozoários que podem estar presentes nos esgotos e nos lodos de esgotos.

Quadro 3.5.3 Principais protozoários que podem estar presentes nos esgotos e nos lodos de esgotos

Protozoário	Doença ou sintoma	Hospedeiro
<i>Balantidium coli</i>	Diarréia, disenteria e ulceração intestinais	Homem e suínos
<i>Cryptosporidium</i>	Diarréias, náuseas, febre e perda de peso	Homem e bovinos
<i>Entamoeba histolytica</i>	Enterite aguda	Homem
<i>Giardia lamblia</i>	Diarréia e perda de peso	Gatos, homem
<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmose	Homem, cães e gatos mamíferos e aves

Fonte: Adaptado de Thomaz Soccol e Paulino (2000) apud Silva et al. (2001) e USEPA (2003).

- Helmintos

Os helmintos são grupos de vermes que vivem como parasitas. Dos três grupos importantes para o homem (cestóides, trematódeos e nematódeos), dois são de interesse sanitário: os cestóides e os nematóides. Diversos autores afirmam que o ambiente dos processos de tratamento de esgotos é favorável ao embrionamento de ovos de helmintos (BONNET; LARA; DOMASZAK, 2000). Conforme relatado por Comparini (2001), existem quatro formas distintas de transmissão: ingestão de ovos ou larvas infectantes pela via oral-fecal; ingestão do estágio larval em tecidos de um outro hospedeiro; penetração ativa do estágio larval na pele e penetração pela picada de um inseto hematófago.

O quadro 3.5.4 apresenta os principais helmintos que podem ser encontrados no lodo de esgoto e as doenças ou sintomas associados.

Dentre os helmintos patógenos, a *Taenia solium* se destaca por ser a zoonose de alta incidência na América Latina. Em seu ciclo evolutivo ela afeta o homem (hospedeiro definitivo) e os suínos (hospedeiros intermediários) (SILVA et al., 2001). Os ovos de *Taenia solium*, uma vez ingeridos pelo homem evoluem ao estado de oncosferas (embriões) que penetram na parede intestinal e acessam os vasos linfáticos e sanguíneos, sendo carreados para diversos órgãos e tecidos, onde se desenvolvem os cisticercos. A neurocisticercose é a manifestação do cisticercos no cérebro resultando em tumores e distúrbios neurofisiológicos graves com alto grau de letalidade. A cisticercose ocular provoca problemas visuais graves, dores e cegueira. O período de incubação no homem varia de 15 dias a vários anos após o contato (BONNET; LARA; DOMASZAK, 2000). Segundo Feachem et al. (1983 apud

COMPARINI, 2001), os tempos de sobrevivência dos ovos de *Taenia* são inferiores aos de *Ascaris*.

Quadro 3.5.4 Principais protozoários que podem estar presentes nos esgotos e nos lodos de esgotos

Helminto	Doença ou sintoma	Hospedeiro
Cestóides		
<i>Taenia solium</i>	Distúrbios digestivos, insônia, anorexia, dor abdominal, distúrbios nervosos, irritação	Homem, suínos
<i>Taenia saginata</i>	Distúrbios digestivos, insônia, anorexia, dor abdominal, distúrbios nervosos	Homem, bovinos
<i>Hymenolepis nana</i>	Diarréia, sinais nervosos	Roedores, artrópodes
Nematóides		
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Distúrbios digestivos, vômito, dor abdominal	Homem
<i>Ascaris suum</i>	Distúrbios digestivos e nutricionais, emagrecimento, tosse, febre	Suíno
<i>Necator americanus</i>	Anemia, emagrecimento	Homem
<i>Trichuris trichiura</i>	Diarréia, anemia, perda de peso, dor abdominal	Homem
<i>Toxocara canis</i>	Emagrecimento, diarréia, febre, desconforto abdominal, sintomas neurológicos	Cães, Homem

Fonte: Adaptado de Thomaz Soccol e Paulino (2000) apud Silva et al. (2001) e USEPA (2003).

Os *Hymenolepis nana* são encontrados nos esgotos e lodos de esgotos onde a doença seja endêmica. Os ovos são resistentes ao calor e dessecação, mas normalmente, sobrevivem menos de 10 dias no ambiente (COMPARINI, 2001).

Os *Ascaris lumbricoides* são os nematóides que apresentam alta incidência na população, podendo variar de 2% a 80%, conforme a região do Brasil e a classe social da população (CASTRO et al., 2000 apud SILVA et al., 2001). *Ascaris suum* é característico de suínos podendo ocasionalmente se desenvolver no homem. Os ovos de *Ascaris sp.* são um dos mais resistentes dos patógenos presentes no lodo, podendo sobreviver até sete anos no solo.

Conforme registros e pesquisas, os *Ascaris sp.* podem ser utilizados como indicadores nos processos de higienização dos lodos (SILVA et al., 2001). Necessitam de pequena quantidade de oxigênio para se desenvolver e podem se manter viáveis por longos períodos, em condições anaeróbias (COMPARINI, 2001). Segundo Godinho, Chernicharo e Honório (2003), uma fêmea de *Ascaris* pode eliminar cerca de 200 mil ovos por dia, que somados à frequência de parasitismo da população, ao grande tempo de sobrevivência no meio externo e às condições precárias de saneamento da população, tornam a ascaridíase uma das helmintoses mais disseminadas no mundo.

Toxocara são parasitas de cães e gatos e o homem é o hospedeiro acidental. A sobrevivência no solo, em condições de temperatura entre 15°C e 35°C, com proteção solar, é de duas a cinco semanas (COMPARINI, 2001).

Os ovos de *Trichuris trichiura* levam de duas a cinco semanas para desenvolver estados infectivos, em ambientes úmidos e quentes. As tricuriases são infecções extremamente comuns onde o clima é úmido e com nível de pobreza elevado, sendo comum também em países desenvolvidos (FEACHEM et al., 1983 apud COMPARINI, 2001).

Pesquisas desenvolvidas no Estado do Paraná, sobre a viabilidade dos ovos de helmintos no lodo e no solo, indicaram a presença no lodo digerido da ETE Belém de: *Ascaris lumbricoides*, *Trichuris trichiura*, *Toxocara sp.*, *Enterobius vermicularis*, e dos cestóides *Hymenolepis nana*, *H. diminuta* e *Taenia sp.*. Em lodos digeridos anaeróbios de alguns reatores tipo USAB foram encontrados *Ascaris lumbricoides*, *Trichuris trichiura*, *T. vulpis*, *Toxocara sp.*, *Enterobius vermicularis*, e dos cestóides *Hymenolepis nana*, *H. diminuta* e *Taenia sp.*. Os ovos de *Ascaris lumbricoides* foram a maioria dentre as demais espécies (BONNET; LARA; DOMASZAK, 2000).

3.5.2 Monitoramento da qualidade sanitária do lodo por organismos indicadores

Os organismos indicadores de presença de patógenos foram introduzidos na microbiologia sanitária para suprir uma necessidade prática que indicasse o nível de patogenicidade da água, esgoto ou lodo. Para conceituar um microrganismo como indicador, devem-se levar em consideração certas bactérias que possuem técnicas analíticas simples, que fazem parte da flora intestinal e são relativamente resistentes. A presença dessas bactérias corresponderá à presença de matéria fecal e a provável contaminação por patógenos (SILVA et al., 2001).

Os organismos indicadores representam os organismos que possuem respostas aos processos de tratamento e condições ambientais de formas similares aos outros organismos, fornecendo então informações de sobrevivência de um grande grupo (USEPA, 2003).

A norma americana (USEPA, 2003) estabeleceu que a viabilidade dos ovos de helmintos fosse representada pelo *Ascaris sp.*, por ser o helminto mais resistente. Assim, onde os *Ascaris sp.* não sobrevivem, não é possível encontrar outra espécie de helminto sobrevivendo.

Os demais organismos indicadores utilizados no monitoramento sanitário do lodo, tanto para as normas americanas quanto para as brasileiras são:

- a) para os vírus - o subgrupo dos vírus entéricos representa o indicador;
- b) bactérias: as *Salmonellas sp.* são indicadoras por estarem presentes em altas densidades comparada a outros patógenos; e os coliformes termotolerantes, são utilizados como indicadores da probabilidade da presença de outros patógenos.

Os coliformes são fáceis e baratos de serem medidos e a sua densidade decresce na mesma proporção dos patógenos entéricos bacterianos, quando expostos em condições adversas no processamento do lodo (USEPA, 2003).

3.5.3 Inativação de ovos de helmintos e coliformes termotolerantes em lodos higienizados com cal

A inativação de bactérias e protozoários ocorre de forma rápida ocasionada por fatores ambientais como a temperatura e o pH, tornando-os pouco significativos como indicadores de proteção à saúde pública. Já os ovos de helmintos, pela sua maior capacidade de sobrevivência tornou-se o indicador mais importante para a avaliação das condições sanitárias do lodo de esgoto. Vírus, helmintos e protozoários não se reproduzem fora de seu específico organismo hospedeiro. Portanto, uma vez inativados, não são capazes de crescer novamente (PINTO, 2001).

De acordo com Mendez (2003 apud BARROS; COSTA; ANDREOLI, 2006), a estabilização alcalina tem a propriedade de elevar o pH, produzindo NH_3 , que penetra na membrana dos ovos de helmintos e no seu interior, desnaturando as enzimas responsáveis pelo metabolismo do organismo, ocasionando a sua morte. Segundo Allievi et al.(1994 apud BARROS; COSTA; ANDREOLI, 2006), a atividade inibidora dos álcalis atua nos seguintes sítios vulneráveis da célula: a) na síntese da parede celular, b) na função da membrana, c) na síntese protéica, d) no metabolismo dos ácidos nucleicos, e) nas reações enzimáticas.

Segundo Pecson (2007), para se atingir a inativação dos ovos de helmintos em taxas superiores a 90% o tempo mínimo de estocagem varia de 2 horas a 180 dias. Os fatores que contribuem para essa variação são: a temperatura, a dosagem e o pH durante a estocagem. O grau de inativação obtido depois da estocagem do lodo tratado depende do valor inicial do pH e do tempo de estocagem. A adição de cal virgem ao lodo desaguado e a posterior estocagem de três meses com manutenção do pH acima de 12 foi recomendado por Gaspard (1997 apud CAPIZZI-BANAS et al., 2004).

Estudos sobre a eficiência da calagem, realizados pela Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), demonstraram a eficiência do tratamento na eliminação de patógenos observadas em análises de lodo caleado a 50%, coletadas no 20º dia, apresentando redução de 100% de coliformes fecais, salmonelas, estreptococos, cistos de protozoários e larvas de helmintos; de 99,5% para coliforme total e 77,3% para ovos de helmintos (TSUTIYA, 2002). Segundo Fernandes (2000 apud TSUTIYA, 2002), estudos posteriores demonstraram que o tempo ideal de estocagem seria de três meses.

O efeito da calagem na eliminação dos patógenos do lodo foi pesquisado e citado por Barros, Costa e Andreoli (2006). Os resultados demonstraram a eficiência na remoção de coliformes até concentrações abaixo do nível de detecção (200 NMP. 100g⁻¹ MS) inferior ao limite de restrição da resolução Conama nº 375 (CONAMA, 2006).

3.5.4 Fatores determinantes no processo de calagem

- pH

Quando se eleva o pH do lodo de esgoto, ocorre alteração da natureza coloidal do protoplasma celular dos patógenos de forma letal, produzindo um ambiente inóspito para a sua sobrevivência. A atividade microbiana se desenvolve em ambientes com pH entre 6,5 e 9,0, por isso o pH é a condição básica na redução de microorganismos do lodo (PINTO, 2001). Outro aspecto relacionado ao pH elevado, além da eliminação de bactérias, é de impedir a movimentação de metais pesados através do solo (JÚNIOR; JORDÃO; PAIXÃO, 2001).

A elevação do pH do lodo depende do pH inicial e da umidade do material, além de outros fatores como a solubilidade e a reatividade do reagente alcalino utilizado (ANDREASE, 2001 apud PEGORINI, 2006b).

- Temperatura

A temperatura excessiva pode promover a desnaturação protéica e/ou a inativação de enzimas fundamentais ao desenvolvimento dos organismos patógenos (ANDREOLI et al., 2001 apud LIMA et al., 2005). A umidade associada à temperatura constitui um importante fator limitante ao desenvolvimento de organismos patógenos (LIMA et al., 2005). Conforme as exigências da USEPA (2003), a temperatura mínima para promover a destruição de coliformes termotolerantes é de 70°C, considerando um tempo de exposição mínimo de 60 minutos. Estudos laboratoriais da termoresistência de ovos de helmintos e coliformes termotolerantes realizados por Lima et al. (2005), demonstraram que, em um tratamento térmico do lodo, temperaturas acima de 55°C são eficientes no processo de higienização. Os mesmos autores alertam para se considerar a distribuição de calor em todo o material. Por outro lado, Ramos et al. (2007) concluíram em pesquisa realizada na ETE Pavuna, no Rio de Janeiro, que a secagem térmica do lodo em temperaturas abaixo de 100°C não confere estabilidade ao lodo, pelo fato da geração de odores e atratividade de vetores que persistiram, apesar da baixa umidade. Os autores recomendaram a adição de cal para a estabilização do lodo com temperaturas menores que 100°C.

No processo de higienização alcalina do lodo, durante a mistura da cal virgem com o lodo ocorre a reação da cal com a água, liberando calor (reação exotérmica) e consequentemente, aumentando a temperatura. Quanto maior o teor de sólidos do lodo, maior a temperatura. Isso se deve à maior quantidade de água em lodos com menor teor de sólidos e ao calor específico da água, que sendo muito maior que o do lodo, consome o calor resultante da reação exotérmica.

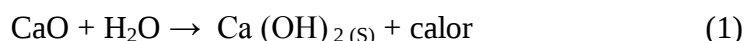
Andreoli, Ferreira e Chernicharo (2003) citaram resultados de pesquisas em que foram submetidos ovos de *Ascaris suum* e *Ascaris lumbricoides* às temperaturas de 22°C, 30°C e 40°C e que aqueles foram inativados após um período de 14 dias em meio alcalino (pH=11,9) à temperatura de 30°C, e após 7 dias em meio alcalino ou neutro a 40°C.

- Agente alcalinizante: cal virgem e cal hidratada

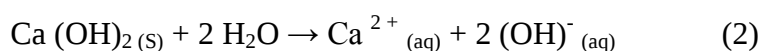
Segundo Joklik et al. (1998 apud BARROS; COSTA; ANDREOLI, 2006), os álcalis exercem atividade bactericida devido seus íons (OH⁻) livres, que alteram o pH do meio, por meio das moléculas dissociadas e pelo aumento da temperatura.

A cal virgem (CaO) e a cal hidratada (Ca(OH)₂) são os principais reagentes utilizados para estabilização alcalina na Europa e nos EUA. A diferença do efeito de cada uma no processo de higienização está na reação exotérmica resultante da extinção da cal virgem, o que não ocorre com a cal hidratada (PEGORINI et al., 2006b). Segundo os mesmos autores, a química da estabilização alcalina utilizando-se a cal virgem obedece as seguintes reações, representadas pelas equações (1) e (2), sendo o aumento do pH determinado pela equação (2):

Extinção da cal virgem formando cal hidratada:



Aumento do pH pela reação da cal extinta com a água livre do lodo:



Segundo o Ministério da Ciência e Tecnologia (2002 apud PEGORINI et al., 2006a), o termo cal é utilizado na literatura brasileira e nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), para designar o produto composto predominantemente por óxido de cálcio (CaO) ou por óxido de cálcio e óxido de magnésio (CaO, MgO), resultante da calcinação de calcários, calcários magnesianos e dolomitos. As cales são classificadas conforme os teores de óxidos em: Cal calcítica (óxido de cálcio entre 100% e 90% do peso total); Cal magnesiana (óxido de cálcio entre 90% e 65% do peso total); Cal dolomítica (óxido de cálcio entre 65% e 58% do peso total).

Christy (1990) relata que os compostos químicos neutralizantes da acidez presentes nas cales têm diferentes capacidades de neutralização de ácidos. O MgO da cal dolomítica não hidrata sob condições atmosféricas, reagindo apenas o CaO. Com base nessas informações, a cal calcítica hidrata mais rapidamente que a cal dolomítica devido à presença de maiores teores de óxidos de cálcio. Pegorini et al. (2006a), em pesquisa sobre o aperfeiçoamento da higienização por meio da caleação, concluíram que a cal calcítica apresenta reação mais efetiva no aumento de temperatura que a cal dolomítica, requerendo menores dosagens de cal para obter-se o mesmo benefício. Os mesmos autores observaram também que a granulometria fina da cal é um fator fundamental para assegurar a reatividade, especialmente nas cales com baixa concentração de CaO, possibilitando a solubilização dos óxidos e acelerando a reação de hidratação.

No processo de higienização do lodo com cal, vários estudos têm demonstrado a necessidade de manter o pH cima de 12. Diversos autores, citados por Gantzer et al. (2001),

dentre eles, Reimers et al. (1998), Gaspard et al. (1997) e Amer (1997) demonstraram que o pH entre 12 e 12,6 por um período de 20 a 60 dias foram suficientes para eliminar salmonelas e ovos viáveis de nematóides. Conforme resultados de pesquisas de Gantzer et al. (2001), o aumento do pH a 11,9 até 12,4, pela adição de cal virgem ou hidratada, não deve ser considerada eficiente na eliminação de helmintos, a não ser que se mantenha um pH de no mínimo 11,5 e por 6 meses de estocagem, para se garantir uma qualidade sanitária ao lodo.

- Dosagem e Eficiência da mistura

As dosagens dos reagentes, calculadas em função da concentração de cal virgem e da concentração de sólidos totais do lodo têm influência significativa sobre o pH ao final do período de estocagem de 30 dias, conforme investigaram Pegorini et al. (2006b). De acordo com os resultados de sua pesquisa, as taxas de adição de 30% de cal virgem em relação ao ST são suficientes para manutenção do pH acima de 12 em lodos mais úmidos (com teor de ST inferior a 30%) e para os lodos secos, estas faixas poderiam ser reduzidas para 12% e 17% de Cal virgem/ST. Esses resultados confirmam que as dosagens para manter o mesmo pH em lodos secos e úmidos são menores em lodos mais secos.

Fernandes et al. (1999 apud PEGORINI et al., 2006b) encontraram níveis diferenciados de eficiência da calagem na redução de patógenos do lodo da ETE Belém, em Curitiba (PR) em função da quantidade de cal virgem adicionada ao lodo. Segundo os autores, a higienização dos lodos pelo processo alcalino, utilizando-se a cal, depende da utilização de dosagens do reagente alcalino suficiente para manter o pH na faixa de 12 por pelo menos 30 dias e também para proporcionar um pulso de calor suficiente para elevar a temperatura da massa a 70°C por 20 a 30 minutos.

A manutenção do processo de mistura durante a fase de reação da cal virgem com o lodo, melhorou os resultados de aquecimento da mistura, possivelmente pelo maior contato das partículas de cal com a água do lodo (PEGORINI et al., 2006a). Segundo os autores, o tempo de mistura é fator fundamental para garantir a reação da cal virgem e o contato com toda superfície do lodo. A cal virgem de boa qualidade (alta concentração de CaO e granulometria fina) reage com água para formação de Ca(OH)_2 em menos de 30 segundos. Para que a reação seja homogênea, promovendo a alcalinização de toda a massa de lodo é necessário que haja uma boa mistura do lodo com a cal, fator associado ao tempo de mistura e o tamanho de partículas do lodo (torrões). Trabalhos citados em sua pesquisa e realizados pela RDP Technologies Inc. (MUPHS, s.d. apud PEGORINI et al., 2006b) indicam grande

influência para a permanência do pH na faixa ideal após o processamento da mistura, da qualidade de mistura e, em especial do tamanho das partículas. Isto viabiliza a redução de dosagens e custos por meio da otimização do processo de mistura. A formação de área sem cal, ou seja, com baixo pH, resultará em atividade biológica e rápida queda de pH resultante dos metabólicos ácidos microbianos, acelerando a recontaminação. Esse fato é relevante, para os lodos com ST > 50%, comuns aos lodos provenientes de leitos de secagem, onde os torrões são de difícil quebra, podendo ser mantidas áreas de lodo sem contato com a cal.

A mistura do lodo com a cal pode ser feita de maneira simplificada e por batelada (manual, betoneira) ou de maneira contínua com equipamentos industriais (PINTO, 2001).

- Teor de umidade

Estudos desenvolvidos por Comparini (2001), que partiu do princípio da perda de umidade do lodo para a redução da concentração de microrganismos, indicaram resultados bastante expressivos com a secagem em estufas agrícolas para higienização do lodo.

Com a secagem natural do lodo perde-se uma percentagem muito grande de umidade, reduzindo também os ovos de helmintos e os coliformes termotolerantes. Resultados apresentados por Peixoto et al. (2005) evidenciaram a eficiência do pátio de secagem na ETE Melchior, em Brasília, de 86% para 25% da umidade, apresentando uma média de 71% de umidade, em um período de 30 dias. Vale ressaltar que esse dado foi obtido no monitoramento entre agosto de 2003 e setembro de 2003, período de estiagem.

A influência do clima e da estação do ano na redução da umidade e na redução significativa dos ovos de helmintos foi verificada em várias pesquisas relativas aos processos de higienização de lodo no sul, sudeste e nordeste do Brasil (PEGORINI; HARTMANN; ANDREOLI, 2007).

Pegorini et al. (2006a) constataram que a reação do lodo com a cal ocorre mesmo com baixos teores de umidade, e assim, maiores temperaturas são alcançadas na mistura, podendo chegar até a combustão. Os mesmos autores observaram também que a eficácia da cal é melhor para os lodos mais secos, desde que ainda haja uma quantidade de água suficiente para que a cal possa reagir com as moléculas de água e assim provocar o aquecimento da mistura. Nesse caso, a desinfecção do lodo associa além dos fatores da estabilização alcalina, a restrição da umidade para a sobrevivência dos patógenos. Em suas pesquisas verificaram que lodos mais secos (49% e 60% de ST) demandam dosagens menores

de cal para alcalinização e manutenção do pH elevado, enquanto que lodos mais úmidos demandam maiores dosagens relativas aos teores de ST.

- Tempo de estocagem

A estocagem do lodo por si só não promove a higienização. Pesquisa realizada por Comparini e Além Sobrinho (2003) na ETE Franca, em São Paulo, demonstrou que o lodo estocado em valas cobertas por 357 dias, não apresentou reduções significativas dos indicadores de qualidade sanitária do lodo.

Os organismos patógenos expostos a níveis extremos de pH por períodos prolongados, seja ácido ou alcalino, tendem a ser destruídos (ILHENFELD et al., 1999 apud PEGORINI et al., 2006b).

No Paraná, pesquisas têm demonstrado que é necessário um tempo de contato de 30 a 60 dias, para que o efeito da calagem seja otimizado. No programa implantado em Curitiba, os pátios de estocagem foram dimensionados prevendo-se este período de contato antes da utilização do lodo (FERNANDES et al., 2001). Aisse, Fernandes e Silva (2001) sugerem a estocagem do lodo por um período de pelo menos 120 dias no caso de variações sazonais de demanda agrícola. Estudos realizados por Eriksen, Andreassen e Ilsoe (1995), investigando a inativação de ovos de *Ascaris suum* durante o tratamento do lodo com cal virgem concluíram que a manutenção do pH acima de 12 e 3 meses de estocagem para lodos tratados com cal podem ser recomendados para o uso posterior na agricultura. Gaspard, Wart e Schwartzbrod (1997) também corroboram com a estocagem de 2 a 3 meses e dosagem de cal suficiente para manter o pH em 12,5 de forma a se alcançar um lodo isento de ovos viáveis de helmintos.

- Efeito da calagem nos nutrientes

Nos Estados Unidos da América (EUA), o United State Department of Agriculture (USDA) considera um biossólido típico contendo 40% de matéria orgânica, 4% de nitrogênio, 2% de fósforo e 0,4% de potássio (USDA, 1980 apud MALTA; TSUTIYA, 2003).

A adição de cal ao lodo provoca uma perda expressiva de nitrogênio (em torno de 50%), crescente proporcionalmente à dosagem de cal aplicada, mas mesmo assim o lodo digerido anaerobicamente e caleado apresenta teor médio de 1,5% de nitrogênio por ou 15 kg

por tonelada de matéria seca (MS) (ILHENFED et al., 1999 apud BARROS et al., 2005). Segundo Malta e Tsutiya (2003), em experimento de calagem com lodo da ETE Lavapés, em São José dos Campos, na medida em que se aumentou a dosagem de cal aplicada ao lodo, ocorreu a redução na concentração nitrogênio, fósforo, potássio, cobre, zinco, ferro, matéria orgânica e o aumento de cálcio.

A conversão de NH_4 em amônia (NH_3) é de 50%, quando o pH atinge o valor de 9,4, e 100% para o pH acima de 11,4 (MUSH, s.d.). Embora represente uma perda expressiva de nitrogênio, esse processo auxilia na inativação dos patógenos presentes no lodo (BURNHAM et al., 1992 apud PEGORINI et al., 2006a).

- Efeito da calagem nos metais

Com a elevação do pH do lodo haverá uma grande influência na absorção de metais pelo solo e pelas plantas. O lodo com baixo pH (menor que 6,5) promove a perda e a percolação de metais pesados eventualmente presentes na massa de lodo. O elevado pH (maior que 11) além de propiciar a redução de bactérias, impede a movimentação de metais pesados através do solo (JÚNIOR; JORDÃO; PAIXÃO, 2001). Todavia, há que se considerar que em esgotos domésticos, quando há um controle na fonte geradora, impedindo contribuições industriais, não deve haver metais pesados.

3.5.5 Custos

Uma breve consideração sobre os custos operacionais envolvidos no processo de calagem foi realizada, cabendo ressaltar que o custo por tonelada de lodo higienizado está diretamente associado à dosagem de cal utilizada e ao teor de umidade do lodo higienizado.

A United States Environmental Protection Agency (USEPA) argumenta que sempre que os custos dos reagentes alcalinos não sejam elevados e a aquisição for facilitada, a estabilização alcalina é a melhor opção do ponto de vista econômico (PEGORINI, 2006b).

A cal representa aproximadamente 50% dos custos operacionais do processo de reciclagem agrícola do lodo nos sistemas com desaguamento em leito de secagem. Estimativas baseadas em cálculos teóricos da Sanepar para o processamento do lodo de todo o estado ($4.000 \text{ m}^3 \cdot \text{mês}^{-1}$, em 2004), cuja demanda de cal estava entre 700 e 900 toneladas mensais, apontavam para um custo de R\$ 300,00 por tonelada (USEG, 2004 apud PEGORINI; HARTMANN; ANDREOLI, 2007). Segundo os mesmos autores, o pátio para

estocagem apresentava custos de investimentos da ordem de R\$180,00 por metro quadrado, com capacidade de estocagem aproximada de 1 m³ a 1,5 m³ de lodo caledo por metro quadrado de pátio.

Segundo Harry (1995 apud CANZIANI et al., 2001), em estudos realizados na ETE Belém, em Curitiba, para cada tonelada de lodo (com aproximadamente 13% de sólidos secos) deveriam ser adicionados 65 kg a 91 kg de cal virgem, conforme a dosagem de 50% ou 70% de cal relativa ao ST. Considerando, na época, o preço de R\$ 78,00 por tonelada de cal virgem, o custo desse insumo por tonelada de lodo higienizado oscilaria entre R\$ 5,07 a R\$ 7,10, respectivamente. Esses valores atualizados, tendo como referência o preço da cal virgem adquirida pela Saneago (R\$0,63 por quilo) seriam de R\$ 40,95 a R\$ 57,33 por tonelada. Com base no custo total envolvendo os custos de implantação da unidade de higienização (custo fixo) e os custos variáveis (custos de operação), desdobrados pelo autor, para higienizar uma tonelada de lodo com 13% de ST e dosagem de 50% de cal virgem, tem-se que 90% do custo total se refere aos custos de operação (cal, energia, locação de pá carregadeira e operador). Dos custos de operação, 76% representam o custo da cal. O custo fixo, para a produção de 80 toneladas diárias, compreende um sistema de mistura da cal, silo com capacidade de armazenar 40 toneladas, construção de 50 m² de galpão e 2.400 m² de depósito para o lodo tratado. Referenciando esses percentuais aos custos atuais, o custo operacional de uma tonelada de lodo com 13% ST e higienizado com 50% de cal virgem seria de R\$53,80 por tonelada, e somados aos custos de implantação seria de R\$ 59,80 por tonelada.

Na ETE Goiânia, o tratamento do lodo do tipo primário quimicamente assistido consome diariamente 3,6 toneladas de cal virgem. Somente o custo do produto corresponde a R\$2.300,00 por dia, considerando o custo da cal a R\$0,63 por quilo, adquirida a granel.

Os preços praticados no mercado, para a cal hidratada e a cal virgem, praticamente não diferem, estando o valor em torno de R\$10,00 o saco de 20 kg.

3.5.6 Vantagens e desvantagens do processo

Segundo Pinto (2001), devido à alta concentração de amônia nos lodos anaeróbios, ocorre a exalação de odores quando o pH é elevado, causada pela volatilização da amônia (*stripping*), embora a amônia auxilie na redução de patógenos. Outra desvantagem, apontada pelo mesmo autor, está relacionada ao acréscimo de sólidos para disposição final. No entanto, como a maioria dos solos brasileiros requer uma correção do pH, essa

desvantagem pode ser desconsiderada, dependendo das condições específicas de uso agrícola do lodo. Por se tratar de uma tecnologia fácil e simples de se utilizar, não necessitando de grandes investimentos, a higienização por meio da cal é uma alternativa viável principalmente para pequenas quantidades de lodo.

A estabilização alcalina é um processo de fácil operação, que pode ser implantado facilmente em estações de tratamento de pequeno porte, possibilitando o uso do lodo caledo na correção da acidez do solo, em adubação de jardins, desde que respeitados os critérios estabelecidos pela legislação (BARROS et al., 2005).

A estabilização química vem ganhando campo nos últimos anos, pois o custo de implantação é menor comparado ao sistema de estabilização biológica por meio de digestores anaeróbios, no entanto os custos operacionais são maiores (RAMOS et al., 2007).

3.6 RECICLAGEM AGRÍCOLA DOS LODOS DE ESGOTOS

3.6.1 Breve histórico do uso agrícola do lodo no Brasil e no mundo

A reciclagem agrícola do lodo de esgoto no Brasil é um tema ainda negligenciado, enquanto que em países desenvolvidos é uma prática já consagrada. Embora com um restrito atendimento à população com serviços de coleta e tratamento dos esgotos, os projetos das estações de tratamento, até então implantados, indicavam apenas as palavras “disposição final adequada” ou destino final “aterro sanitário” como solução para os resíduos gerados, em especial os lodos. Com relação aos resíduos sólidos urbanos, Lara (2001) relata que no Brasil, em 75% das cidades o lixo é depositado em vazadouros a céu aberto e apenas 25% recebem tratamento mais adequado, dos quais 12% correspondem a aterros controlados, 9% a aterros sanitários e o restante é destinado à compostagem, incineração e reciclagem. Diante desse cenário, a disposição de lodos de esgotos em aterros fica restrita, e ainda assim, não deixa de ser um passivo ambiental, podendo esta prática, na maioria dos casos, ser considerada de caráter provisório enquanto a solução da reciclagem se ajuste à situação.

Dentro de um panorama mundial, as questões ambientais tomaram vulto a partir da década de 70. Andreoli e Fernandes (2001) relatam que os procedimentos de avaliação de impacto ambiental começaram a ser empregados nos EUA na década de 60. Em 1972, na histórica Conferência de Estocolmo, apenas 11 países tinham instituído órgão de controle ambiental, mas em 1986, este número passou para 106. Atualmente, a maioria dos países já possui instituições de controle ambiental. Nos EUA e na Europa, a disposição oceânica foi

proibida, e a Comunidade Econômica Européia, desde 1992 estabeleceu prazos a partir dos quais será permitida a disposição em aterros sanitários apenas de “resíduos últimos”, definidos como resíduos que passaram por uma triagem para serem reciclados, gerando uma fração imprópria para qualquer tipo de reciclagem (LARA, 2001). As exigências crescentes da sociedade e a busca pela sustentabilidade apontam a reciclagem agrícola dos lodos como uma forte tendência de crescimento. Recentemente, em 2007, a Organização Mundial da Saúde (OMS) recomendou a reciclagem agrícola dos lodos gerados em ETE's, destacando que esta prática beneficia a sociedade por meio do cultivo de alimentos e da conservação dos recursos naturais (BITTENCOURT et al., 2008).

Segundo Andreoli (2008), os índices de reciclagem agrícola em algumas regiões, no contexto mundial são os seguintes: Espanha 70%, Noruega 62%, Japão 15%, Canadá 29%, Nova Zelândia 50%, EUA 60% e Europa 37%.

No Brasil, as experiências com o uso agrícola do lodo tiveram início na década de 80. Bettiol e Carvalho foram os primeiros pesquisadores a publicar sobre o assunto (POGGIANI; SILVA; GUEDES, 2006). A reciclagem agrícola do lodo tem sido do interesse especialmente dos Estados do Paraná, São Paulo e Distrito Federal.

No Paraná, em 1988, a Sanepar definiu como tema prioritário de pesquisa a questão da disposição final dos lodos de esgotos gerados em suas estações de tratamento, iniciando em 1990 um programa de pesquisa voltado para a reciclagem agrícola. O desenvolvimento dos estudos prosseguiu com o apoio de diversas instituições e pesquisadores, em especial do Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (Prosab), financiado pela Financiadora de estudos e projetos (FINEP), Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Programa de Capacitação de Recursos Humanos para Atividades Estratégicas (RHAE), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e Caixa Econômica Federal (CEF) e de investimentos da Sanepar em projetos específicos (LARA, 2001). Em 1997 a Sanepar elaborou o Manual Técnico para utilização Agrícola do lodo de esgotos no Paraná e desde o ano 2000 tem obtido resultados com o uso agrícola do lodo. Segundo Fernandes et al. (2001) foram reciclados na agricultura, até fevereiro de 2001, 6.000 toneladas de lodo higienizado com cal na região metropolitana de Curitiba. O uso predominante foi para a cultura de milho (94%), seguido de fruticultura (4%) e produção de grama (2%), beneficiando 76 ha, constatando aumento na produção de milho de 30% a 70% com o uso do lodo. Em 2007, período de adaptação às determinações da resolução Conama n°375, as ETE's da Região Metropolitana de Curitiba (RMC) destinaram 8.903 toneladas de

lodo (umidade média de 64%) para aplicação em 295 ha nos cultivos de milho, feijão, soja e fruticultura. Foram atendidos 29 agricultores que obtiveram uma economia de R\$ 467,90 por ha, na redução do uso de adubos químicos e de calcário (BITTENCOURT et al., 2008).

No Estado de São Paulo, a Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo (Sabesp) tem financiado desde 1998, pesquisas sobre o uso do lodo em reflorestamentos em parceria com a Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz (ESALQ) e o Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) (IPEF, 2007). O Plano Diretor de uso e disposição dos lodos da região metropolitana de São Paulo (RMSP) foi elaborado pela Sabesp em 1998, contemplando as cinco grandes estações de tratamento de esgotos (Barueri, Suzano, Parque Novo Mundo, ABC e São Miguel) que juntas produzirão em 2015, 749 toneladas de lodo por dia. Esse estudo recomendou o aterro sanitário, o uso agrícola e a incineração como alternativas viáveis.

Com relação ao uso agrícola as experiências em São Paulo foram positivas na ETE Franca, onde em 1999 utilizou-se o lodo em cultura de café, quando o então denominado “biossólido” recebeu o registro no Ministério da Agricultura de Sabesfértil. Em 1999 as normas da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (Cetesb) para a reciclagem agrícola do lodo foram editadas pela primeira vez. De 1999 a 2007, foram totalizados 80 projetos de aplicação dos lodos da ETE Franca, envolvendo 12 municípios, 2.222 ha, 87.285 toneladas de lodo, base úmida, tendo como principais culturas o café e o milho (REAMI; COMPARINI, 2008).

No Distrito Federal (DF), desde a década de 60, quando a Companhia de Águas e Esgotos de Brasília (Caesb) iniciou a operação das primeiras ETE's, os agricultores locais retiravam os lodos produzidos mediante o pagamento de uma taxa. Devido à conscientização quanto à qualidade do lodo, a partir da década de 90 a disposição agrícola do lodo passou a ser supervisionada pela Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (Emater), com cadastramento do agricultor e apresentação do receituário agrônômico. Essa atividade foi promissora até 2003, quando um acidente durante o transporte de uma carga de lodo resultou na contaminação de uma nascente. O Uso na agricultura ficou então proibido, exceto para os lodos de qualidade tipo A, segundo a padronização americana, pois na época ainda não existia as normas brasileiras (SILVA, 2005). Atualmente, todo lodo gerado no DF vem sendo disponibilizado para áreas degradadas, por se tratar de um lodo tipo B (SILVA, 2005).

3.6.2 Aspectos de interesse agrônômico do lodo de esgoto

Os nutrientes encontrados em maior quantidade no lodo de esgoto, são o nitrogênio, o fósforo e, em menor escala, o potássio. Em lodos tratados com cal, grandes quantidades de Ca e Mg são adicionadas. A matéria orgânica exerce importante efeito sobre as propriedades físicas do solo, facilitando a penetração das raízes e a vida microbiana. Atua junto à resistência do solo à erosão aumentando sua capacidade de retenção de água. A disponibilidade da matéria orgânica e dos nutrientes, associados ao Ca e Mg, atua diretamente na produtividade de uma área agrícola, principalmente para gramíneas (milho) e leguminosas (feijão) (ANDREOLI et al., 1997).

Segundo a Sanepar (1997 apud MACHADO, 2001), a incorporação dos biossólidos ao solo traz aspectos positivos nas características físicas, químicas e biológicas do solo, como:

- Ação nas propriedades físicas: a matéria orgânica favorece a formação de agregados, o que facilita a penetração das raízes e a vida microbiana; estabiliza a estrutura do solo, melhorando sua resistência à erosão; aumenta a capacidade de retenção de água no solo, tornando as culturas mais resistentes às secas.
- Ação nas propriedades físico-químicas: os colóides húmicos aumentam a capacidade do solo de reter nutrientes minerais, o que permite melhor uso dos adubos convencionais; a matéria orgânica, no seu conjunto (fresca ou estabilizada) fornece nutrientes para a planta e para os organismos do solo, após a mineralização.
- Ação nas propriedades biológicas: a matéria orgânica é suporte e fonte de alimento para a flora e fauna do solo, cuja atividade influi diretamente na nutrição mineral das plantas.

Diversos autores têm relatado em pesquisas os efeitos do lodo na produtividade e desenvolvimento de culturas, nas características químicas do solo e na densidade populacional de organismos do solo. O uso agrícola do lodo requer controle com relação aos metais pesados e patógenos. Segundo Rocha (1998 apud MACHADO, 2001) a capacidade de assimilação dos metais pelo solo está relacionada com o comportamento químico deles após a aplicação do lodo. A absorção, translocação e acumulação dos metais em plantas e animais é uma variável na determinação dessa capacidade de assimilação. Dentre as propriedades do solo que influenciam na mobilidade dos metais estão o pH, a capacidade de troca catiônica

(CTC), a matéria orgânica e os regimes hídrico e térmico do solo (FIGUEIREDO, 1997 apud MACHADO, 2001).

Nutrientes em excesso também podem ser mobilizados quimicamente no solo e atingir as águas, onde podem estar concentrados poluentes, como nitratos em águas subterrâneas, ou eutrofizar águas superficiais (VILASBOAS; ZIELINSKI, 2005). Segundo os autores, se as doses de aplicação do lodo no solo forem inadequadas pode haver efeito depressivo sobre a produtividade do solo ou afetar negativamente a qualidade dos insumos agrícolas para o uso do homem ou de animais. Além das doses aplicadas ao solo, a condição de baixa estabilização dos lodos pode também favorecer a emissão de odores e atração de vetores.

Com relação aos patógenos, indesejáveis nos lodos, devido aos riscos de contaminação, seja pelo manuseio ou através de culturas que entram em contato direto com o lodo, o controle se inicia nos processos de higienização dos lodos. As limitações de organismos indicadores de contaminação determinam a qualidade do lodo e o seu uso, segundo regulamentações específicas, assim também com relação às concentrações de metais pesados.

O uso agrícola do lodo é a disposição mais acertada do ponto de vista ambiental, porque promove a reciclagem, retornando a biomassa à terra, e fechando assim o ciclo dos elementos químicos e biológicos. No entanto, os cuidados com relação aos aspectos sanitários e de contaminação por metais devem ser objetos de controle desde a fonte de geração dos esgotos, para que o lodo gerado possua as características mínimas satisfatórias para o uso agrícola. No caso dos patógenos existem processos de higienização viáveis para se atingir os padrões de qualidade, mas, com relação aos metais, concentrações acima dos limites de segurança, inviabilizam o uso agrícola.

3.6.3 Aspectos legais da reciclagem agrícola do lodo no exterior

A regulamentação de uso e disposição do lodo de esgoto no exterior teve início por volta da década de 70. Em 1977 surgiu nos Estados Unidos, o termo “biossólidos” e em 1989 as primeiras normas específicas sobre lodos (PATRI, 2008). A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), regulamentou em 22 de março de 1993 o uso e disposição dos lodos de esgotos por meio da norma *Code of Federal Regulations n°40, Part 503 - Standards for the use na disposal of sewage sludge (40 CFR, Part 503)*, muitas vezes denominada apenas como *Environmental*

Protection Agency (EPA) 503. A abordagem da norma americana cobre três disposições do lodo: aplicação no solo (agricultura, jardinagem, reflorestamento e áreas degradadas); disposição no solo sem finalidade de fertilização ou correção das características físicas e químicas do solo e incineração. Essa norma foi fundamentada em critérios de análise de risco segundo quatorze vias de possíveis contaminações do meio ambiente (solo, planta, homem e animal) pelo lodo aplicado no solo (USEPA, 2003). Conforme citado por Machado (2001), esta regulamentação foi desenvolvida por um programa que durou 11 anos e custou 15 milhões de dólares.

Na Europa, em 1986, foi estabelecida uma diretiva para a União Européia que definiu limites de alguns elementos potencialmente tóxicos nos lodos, visando a prevenção de problemas de fitotoxicidade dos produtos gerados, bem como de contaminação das águas superficiais e subterrâneas e do solo. Diferentemente da legislação norte americana, a Diretiva Européia regulamentou os limites dos elementos traço por diversas faixas de pH do solo (MACHADO, 2001). Segundo Figueiredo (1997 apud MACHADO, 2001), a Diretiva da União Européia de 1986 teve como fundamento a observação de valores de concentrações admissíveis de metais pesados no solo que recebe o lodo, a concentração de metais pesados no lodo, e a quantidade máxima anual dos metais pesados permissível no solo. Cada país estabelece sua norma tendo a Diretiva Européia como referência. A diversidade de valores limites dos parâmetros de controle depende de fatores como a composição do lodo gerado, clima, tipos de solo, formas de agricultura, e diferenças geográficas e culturais de cada país.

Na América Latina, somente quatro países, Argentina, Brasil, México e Chile possuem regulamentações para o uso dos lodos de esgotos, sendo que no Chile a regulamentação ainda não está vigente (PATRI, 2008). Segundo a autora, observa-se uma grande influência da norma norte americana, EPA 503, na definição dos critérios de estabilização dos lodos, tratamentos e limites de metais. A Argentina segue os padrões da Comunidade Econômica Européia (CEE) para os metais, enquanto que no Chile esses valores são mais restritivos. As opções de tratamentos mais comentadas com relação aos parâmetros microbiológicos são a compostagem e a estabilização alcalina avançada.

3.6.4 Aspectos legais da reciclagem agrícola do lodo no Brasil

No Brasil, a regulação para o uso e disposição do lodo, especificamente de uso na agricultura, data de 26 de agosto de 2006, pela resolução nº375 do Conama (CONAMA, 2006). Anteriormente a essa data, as experiências e mesmo o uso agrícola do lodo tinha como

referência as normas técnicas do Cetesb de 1999, intitulada Aplicação de Lodos de Sistemas de Tratamento Biológico em Áreas Agrícolas – Critérios para projeto e operação (Manual Técnico) e também do Manual Técnico da Sanepar de 1997.

Os principais aspectos definidos na resolução nº375 do Conama (CONAMA, 2006) são relacionados aos critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgotos sanitários, sendo os mais relevantes os seguintes:

- Relacionados à caracterização do lodo quanto ao potencial agrônômico (parâmetros de carbono orgânico, fósforo total, nitrogênio *Kjeldahl*, nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrato/nitrato, pH em água 1:10, potássio total, sódio total, enxofre total, cálcio total, magnésio total, umidade e sólidos voláteis e totais) determinados conforme os anexos II, III e IV da resolução, relativos aos critérios de análise do lodo de esgoto ou produto derivado e solo, cálculo do nitrogênio disponível no lodo de esgoto ou produto derivado, dos critérios de amostragem de solo e de lodo de esgoto ou produto derivado respectivamente;
- Relacionados à caracterização química quanto à presença de substâncias inorgânicas (os metais pesados: arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, molibdênio, níquel, selênio e zinco) determinados de acordo com os anexos II e IV da resolução, relativos aos critérios de análise e amostragem respectivamente;
- Relacionados à caracterização do lodo quanto à presença de agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos (coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos, salmonella e vírus entéricos) determinados conforme os anexos II e IV da resolução, relativos aos critérios de análise e amostragem respectivamente;
- O anexo I desta resolução faz referência aos processos para redução de agentes patogênicos e atratividade de vetores, onde a estabilização com cal é citada como um dos processos de redução significativa de patógenos e da atratividade de vetores.

Após cinco anos a partir a data de publicação desta resolução, somente será permitida a aplicação de lodo de esgoto tipo 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 tipo B.

Os requisitos mínimos de qualidade do lodo de esgoto destinado à agricultura devem respeitar os limites máximos de concentrações apresentados nos quadros 3.7.1 e 3.7.2.

A frequência de monitoramento das características é função da quantidade de lodo gerada, segundo o quadro 3.7.3.

Quadro 3.7.1 Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado segundo a patogenicidade.

Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado	Concentração de patógenos ⁽¹⁾
A	Coliformes termotolerantes < 103 NMP/g de ST Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo / g ST Salmonella ausência em 10 g de ST Vírus < 0,25 UFP ou UFF / g de ST
B	Coliformes Termotolerantes < 106NMP/g de ST Ovos viáveis de helmintos < 10 ovos / g de ST

Fonte: Resolução Conama nº375 (2006).

⁽¹⁾ NMP, número mais provável; UFP: unidade formadora de placa; UFF: unidade formadora de floco

Quadro 3.7.2 Substâncias inorgânicas limites presentes no lodo de esgoto ou produto derivado para o uso agrícola.

Substâncias inorgânicas	Concentração máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (mg.kg⁻¹, base seca)
Arsênio	41
Bário	1.300
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1.500
Cromo	1.000
Mercurio	17
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2.800

Fonte: Resolução Conama nº375 (2006).

Quadro 3.7.3 Frequência de monitoramento do uso agrícola do lodo ou produto derivado.

Quantidade de lodo de esgoto destinado para aplicação na agricultura (toneladas. ano⁻¹, base seca)	Frequência de monitoramento
Até 60	Anual, preferencialmente anterior ao período de maior demanda pelo lodo
De 60 a 240	Semestral, preferencialmente anterior ao período de maior demanda pelo lodo
De 240 a 1.500	Trimestral
De 1.500 a 15.000	Bimestral
Acima de 15.000	Mensal

Fonte: Resolução Conama nº 375 (2006).

Com relação às culturas aptas a receberem lodo de esgoto, a resolução Conama nº375 (CONAMA, 2006) estabelece o seguinte:

- É proibida a utilização de qualquer tipo de lodo de esgoto ou produto derivado em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, e culturas inundadas, bem como as demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo. Só poderão ser cultivadas essas culturas após o período de 48 meses da última aplicação;
- Pastagens só poderão ser implantadas após um período mínimo de 24 meses da última aplicação do lodo;
- Os lodos tipo A poderão ser utilizados em quaisquer culturas, desde que sejam respeitadas as restrições já comentadas; os lodos tipo B são restritos ao cultivo do café, silvicultura, para a produção de fibras e óleos, com a aplicação mecanizada, em sulcos ou covas, seguidas de incorporação, respeitadas as restrições relacionadas à definição da área.

4 METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida com o lodo gerado na Estação de Tratamento de Esgotos – ETE Lages, localizada em Aparecida de Goiânia–GO e operada pela Saneamento de Goiás S. A. (Saneago). Procedeu-se à higienização do lodo, após desaguamento em leitos de secagem com diferentes dosagens de cal virgem e de cal hidratada e avaliaram-se os efeitos dos tratamentos ao longo do tempo, por 120 dias, a partir da aplicação das cales. Os dados foram coletados de 19 de junho a 23 de outubro de 2008.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Aparecida de Goiânia integra a microrregião de Goiânia, estando a sua sede urbana situada a 18 km do centro da capital do Estado pelo principal acesso, rodovia BR 153. As coordenadas geográficas da sede do município são 16°49'19" de Latitude Sul e 49°14'42" de Longitude Oeste, e a altitude é de 804 m.

A população, segundo IBGE (2007) é de 494.919 habitantes, com uma estimativa de população beneficiada por serviços de esgotos de 14% (SANEAGO, 2001a).

O clima do local, segundo köppen, é do tipo AW (quente e semi-úmido com estação seca bem definida, de maio a setembro, e regime pluviométrico tropical, com temperatura média anual de 23,2°C, com as médias mínimas e máximas de 17,9 °C e 28,8 °C, respectivamente). A precipitação pluvial média anual é de 1.575,9 mm e o total anual de insolação é de 2.588,1 h (BRASIL, 1992).

Situado ao sul de Goiânia e pertencente à sua região metropolitana, o município de Aparecida de Goiânia está conurbado com Goiânia, cujo crescimento foi dirigido em direção sul/sudoeste, desde a década de 70 (OBSERVATÓRIO DAS METRÓPOLES, s.d.). Segundo o estudo, as ocupações do espaço urbano na região metropolitana de Goiânia estão organizadas conforme a hierarquia das classes sociais, onde as áreas localizadas nas franjas da metrópole, compreendendo aí o município de Aparecida de Goiânia, possuem uma ocupação com perfil de população do tipo operário e popular periférico. A área urbana do município de Aparecida de Goiânia que contribui para a ETE Lages concentra uma população de baixa renda e está localizada já no limite com o município de Hidrolândia.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

A ETE Lages trata os efluentes do sistema de esgotamento sanitário da sub-bacia da margem direita do ribeirão Lages, logo após a confluência com o córrego Laginha. A figura 4.2.1 identifica a localização da ETE, e as figuras 4.2.2 e 4.2.3 mostram vistas parciais da ETE Lages.



Figura 4.2.1 Localização da ETE Lages



Figura 4.2.2 Vista parcial dos reatores UASB - ETE Lages



Figura 4.2.3 Vista parcial dos leitos de secagem - ETE Lages

O tratamento dos esgotos da ETE Lages é de nível secundário, consistindo de tratamento preliminar (gradeamento de limpeza manual e desarenador ciclônico), reatores anaeróbios do tipo UASB seguidos de lagoas de maturação, nesta ordem. Na figura 4.2.4 estão relacionadas as unidades componentes da ETE.

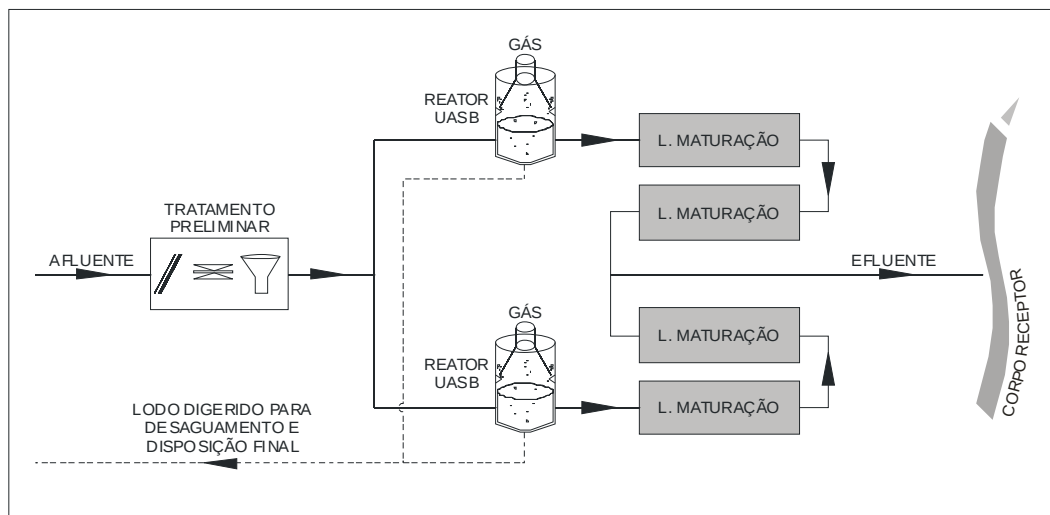


Figura 4.2.4 Representação esquemática das unidades da ETE Lages.

Segundo os dados de projeto (SANEAGO, 2001a), a capacidade instalada da ETE é de 50 L.s^{-1} , correspondendo a uma população a ser atendida de 44.102 habitantes previstos para o ano 2010. Conforme os dados operacionais (SANEAGO, 2008c), a vazão atual afluyente à ETE é de cerca 20 L.s^{-1} , correspondendo uma população atendida de 18.411 habitantes, constatando que a ETE ainda vem operando com vazões e cargas bem abaixo de sua capacidade.

4.2.1 Tratamento Preliminar

O tratamento preliminar da ETE Lages é composto por unidades de gradeamento e de desarenação. O gradeamento, que tem por finalidade reter os sólidos grosseiros presentes no esgoto bruto, é de limpeza manual, com barras espaçadas de 20 mm, inclinadas em 45° .

O desarenador é do tipo gravitacional com movimento espiral, também denominado de desarenador ciclônico, com remoção automatizada da areia utilizando ejetor a ar comprimido (*airlift*). As operações de descargas de areia são realizadas no mínimo duas vezes ao dia e o volume de areia removida é estimado em 30 litros por 1.000 m^3 de esgoto. As

vazões afluentes à ETE são registradas a cada hora em um medidor *parshall*, cuja garganta é de 30,5 cm.

4.2.2 Tratamento Secundário

O tratamento do esgoto é constituído por dois reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), instalados em paralelo, possuindo volume útil unitário de 1.000 m³ e profundidade de 4,5 m. O pós-tratamento dos reatores é do tipo lagoas de maturação, sendo dois módulos em série para cada reator. O projeto previu de 65% a 75% de remoção da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e um volume estimado de 163,50 m³ de lodo a ser descartado, em uma frequência de 21 dias, a uma concentração de sólidos de 4%, considerando uma vazão média afluente de 50 L.s⁻¹ (SANEAGO, 2001a). O processo de desagumamento do lodo é realizado por meio de leitos de secagem, numa bateria de 18 leitos com 42 m² de área cada um.

4.2.3 Esgotos afluentes à ETE Lages

Os esgotos coletados são predominantemente domésticos, por não existirem atividades industriais na área contribuinte da bacia em questão. Essa característica de esgoto doméstico é confirmada pelos resultados das análises de DBO afluente, que permanece sempre dentro dos limites dos valores típicos dos esgotos domésticos, em torno de 300 mg.L⁻¹.

Atualmente, a ETE Lages recebe um volume de esgoto bem abaixo de sua capacidade operacional instalada, registrando uma vazão média de 20 L.s⁻¹. Essa condição é bem comum em situações onde não existe a coleta de esgoto de toda a bacia, sendo a ETE implantada prioritariamente, para depois se implantar as redes e ligações ao longo dos anos, garantindo assim a qualidade ambiental, que muitas vezes não é sustentada financeiramente nos primeiros anos de operação das ETE's.

No quadro 4.2.1 estão apresentados os parâmetros que são monitorados e que caracterizam os esgotos brutos afluentes à ETE Lages.

Quadro 4.2.1 Características dos esgotos brutos afluentes à ETE Lages – valores médios mensais de 2008

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Vazão média (L.s ⁻¹)	20,0	Fósforo Total (mg.L ⁻¹ P) ⁽¹⁾	9,0
pH	7,2	Acidez Volátil (mg.L ⁻¹ CaCO ₃)	124,0
DBO 20° C 5 dias (mg.L ⁻¹ O ₂)	345,0	Nitrogênio Total (mg.L ⁻¹) ⁽¹⁾	94,1
DQO (mg.L ⁻¹ O ₂)	620,0	Nitrogênio Amoniacal (mg.L ⁻¹) ⁽¹⁾	57,1
Sólidos Sedimentáveis (mg.L ⁻¹ .h ⁻¹)	3,9	Nitrogênio Orgânico (mg.L ⁻¹) ⁽¹⁾	37,0
Sólidos Totais (mg.L ⁻¹)	717,0	Óleos e Graxas (mg.L ⁻¹) ⁽¹⁾	57,3
Sólidos Totais Voláteis (mg.L ⁻¹)	392,0	Alcalinidade Total (mg.L ⁻¹ CaCO ₃)	314,0
Sólidos Totais Fixos (mg.L ⁻¹)	325,0	Alcalinidade Bicarbonato (mg.L ⁻¹ CaCO ₃)	174,0

(1) Valores médios do monitoramento em 2007.

Fonte: (SANEAGO, 2008c).

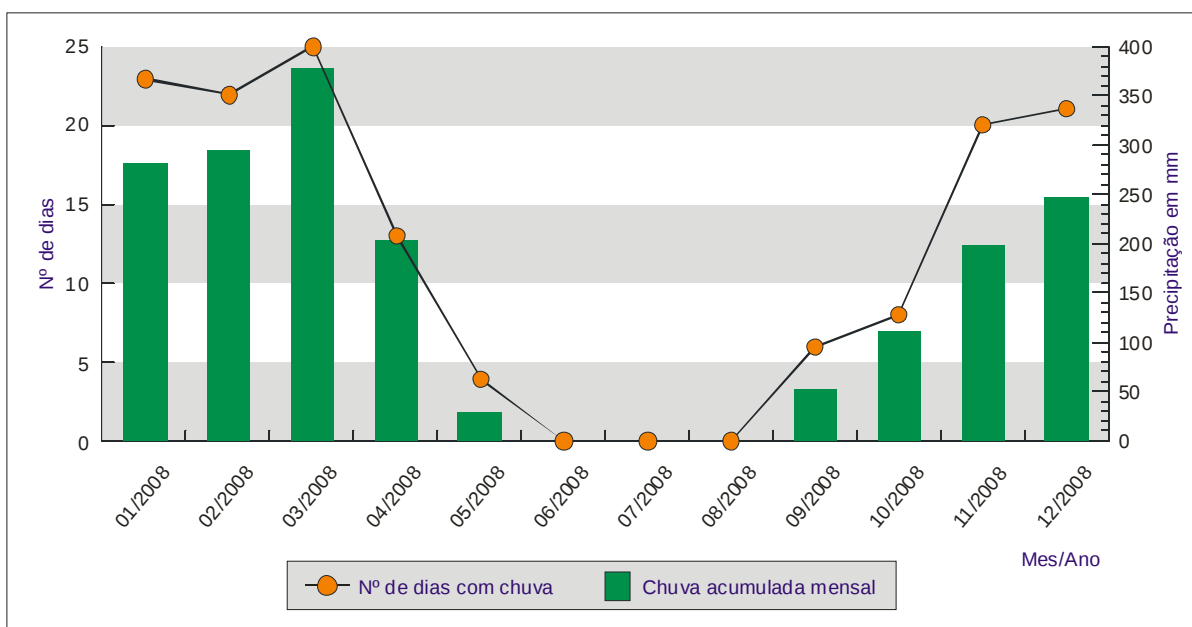
4.2.4 O lodo produzido na ETE Lages

O descarte do lodo digerido excedente dos reatores UASB é feito mensalmente, com descargas de 113 m³, alternadas entre o reator A e o reator B. Esta frequência resulta numa idade do lodo aproximada de 60 dias, bem superior aos valores usuais, o que se deve ao fato da ETE possuir ainda pouca contribuição de esgotos. A qualidade do lodo descartado é avaliada em termos da estabilidade e também com relação às concentrações de ovos de helmintos e coliformes termotolerantes. O lodo é descartado nos leitos de secagem com concentração média de sólidos totais (ST) de 6% a 8%, e 52% de sólidos voláteis (SV). O lodo desaguado é removido dos leitos após 30 a 40 dias, dependendo das condições meteorológicas. No período de estiagem, de maio a agosto, as concentrações de sólidos totais no lodo seco removido superam 50%, o volume médio mensal é em torno de 30 m³ com concentração média de sólidos totais em torno de 50%. A relação média de sólidos voláteis e sólidos totais (STV/ST) de 0,46 e o valor médio do pH é de 5,9. As densidades médias de coliformes fecais do lodo de descarte se encontram na faixa de 10⁶ a 10⁸ NMP, e no lodo desaguado de 10⁴ a 10⁶ NMP. No lodo desaguado, as concentrações de ovos viáveis de helmintos variam de 14 a 40 ovos.g⁻¹ MS, dependendo do tempo de permanência do lodo no leito, sendo a predominância da espécie *Ascaris sp* em mais de 70%

4.3 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DO PERÍODO DO EXPERIMENTO

Considerando que as condições meteorológicas da região exercem influência direta sobre os microorganismos, e que até então as referências de pesquisas similares à esta provêm de outras regiões do país, alguns dados meteorológicos foram observados em campo e também pesquisados no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O clima da região centro-oeste nessa época do ano se caracteriza por um extenso período de seca, marcado por temperaturas médias variando de 23°C a 25°C. O período de estiagem se inicia em maio e se estende até setembro, conforme demonstrado na figura 4.3.1, que apresenta os valores das chuvas acumuladas mensais da estação Goiânia no ano de 2008 (lat.16°38'34", long. 49°13'12", altitude 770 m) situada a 24 km da ETE Lages.

Houve ocorrência de chuvas na ETE durante o período da pesquisa, de 19/06 a 23/10, apenas nos dias 20, 21 e 29/09 e nos dias 02, 03, 04, 05, 11, 19 e 21/10, conforme observado e registrado pelos operadores locais da ETE. Os valores médios de temperaturas do ar, à sombra, observados na ETE pelo período diurno e registrados a cada hora, extraídos dos relatórios operacionais, estão apresentados no quadro 4.3.1.



Fonte: INMET (2008)

Fig. 4.3.1 Dados de chuva acumulada mensal na Estação Automática Goiânia em 2008.

Quadro 4.3.1 Valores médios das temperaturas ambiente registradas na área da ETE no período diurno.

	Temperatura média (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)
Jun/08	22,9	27,5	12,3
Jul/08	22,3	27,3	10,3
Ago/08	25,4	30,5	13,6
Set/08	26,8	31,1	18,2
Out/08	28,1	31,5	21,8

Fonte: (SANEAGO, 2008c)

4.4 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

Para o tratamento alcalino do lodo foram utilizadas a cal hidratada e a cal virgem, caracterizando dois experimentos, analisados separados e conjuntamente, sendo cada experimento constituído de quatro tratamentos diferenciados (uma testemunha, sem adição de cal, e os demais representando três dosagens de mistura de cal pré-definidas), com três repetições. O desenvolvimento da pesquisa caracterizou três fases distintas: a primeira para se definir as concentrações de cal a serem utilizadas, a segunda relacionada com a execução da calagem do lodo em campo e acondicionamento das amostras dos tratamentos anteriormente definidos, e a terceira relativa à programação e execução das coletas para análises laboratoriais, ao longo do tempo. As fases da pesquisa estão descritas a seguir.

4.4.1 Definição das concentrações de cal a serem utilizadas

Para a definição das concentrações em peso seco de cal a serem utilizadas foi realizado um teste preliminar em que se verificou o atendimento ao Anexo I da resolução Conama nº375 (CONAMA, 2006), que trata da redução da atratividade de vetores.

Avaliaram-se quais as concentrações de cal elevariam o pH do lodo até pelo menos 12, por um período mínimo de 2 horas, permanecendo acima de 11,5 por mais 22 horas. Foram testadas as concentrações de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, para a cal virgem e para a cal hidratada. Foi coletada uma amostra de aproximadamente 3 kg de lodo de um dos leitos de secagem. Após a determinação do pH e da umidade da amostra, calcularam-se as massas da cal para cada concentração. Efetuaram-se, manualmente, as misturas de 200 g de

lodo com a respectiva massa de cal, nos dez tratamentos propostos, por um minuto, tempo suficiente para uma perfeita homogeneização da mistura e igual em todos os tratamentos.

A figura 4.4.1 apresenta o processo de mistura manual do lodo com a cal, realizada na bancada do laboratório. O pH foi determinado, imediatamente após cada mistura do lodo com a cal, após 2 horas e após 22 horas da mistura. O quadro 4.4.1 apresenta os valores de pH determinados nas misturas.



Figura 4.4.1 Processo da mistura manual do lodo de esgoto com a cal, realizada no teste preliminar para a definição das concentrações de cal a serem utilizadas.

Quadro 4.4.1 Resultados dos valores de pH das amostras de lodo misturadas às diversas concentrações de cal, nos dois experimentos.

Concentração	pH instantâneo	Após 2 horas	Após 22 horas
Cal (%)	Cal Hidratada		
10	11,99	11,45	10,95
20	12,41	12,38	12,27
30	12,45	12,30	12,48
40	12,34	12,43	12,40
50	12,43	12,39	12,46
Cal (%)	Cal virgem		
10	12,61	12,15	11,65
20	12,36	12,35	12,26
30	12,49	12,33	12,44
40	12,47	12,19	12,11
50	12,31	12,49	12,48

(O pH do lodo sem a mistura da cal foi de 5,2).

Observou-se que para a cal hidratada a concentração de 10% não atendeu à condição de pH próximo de 12 nas primeiras duas horas após a mistura e acima de 11,5, após 22 horas, o que para a cal virgem foi atingido. Buscando-se a redução de patógenos com a menor concentração de cal possível associada a um maior tempo de maturação, definiu-se pela escolha de uma concentração mínima de 15% e, mais duas outras concentrações, de 25% e 35%, para a avaliação da pesquisa, além das testemunhas com 0%.

4.4.2 Calagem do lodo e delineamento dos tratamentos

A calagem foi realizada nos experimentos (um utilizando-se a cal virgem e o outro a cal hidratada), em datas defasadas de 4 dias, em função da disponibilidade do laboratório em realizar as análises. O lodo utilizado foi retirado de um único leito de secagem. Esse lodo foi descartado do reator no dia 03/06 e completava 16 dias no leito quando foi retirado para a pesquisa. Os volumes de lodo foram quarteados no leito, seguindo as recomendações da NBR 10.007 (ABNT, 2004), homogeneizados, quebrados os torrões, e após medidos e pesados foram reservados para as misturas de cal. Em cada tratamento a mistura do lodo com a cal foi feita em betoneira, por um tempo de 3 minutos, suficientes para completa homogeneização. As figuras 4.4.2 e 4.4.3 apresentam algumas etapas da calagem.



Figura 4.4.2 Preparo do lodo para calagem (quebra dos torrões)



Figura 4.4.3 Retirada do lodo caleado da betoneira

O primeiro experimento, com a cal hidratada, foi iniciado no dia 19/06/08 quando foram realizadas as misturas e coletadas as amostras do lodo bruto sem cal e também deste misturado à cal hidratada, nas concentrações previstas de 15%, 25% e 35% (com base em peso seco, relativo ao teor de sólidos totais), em triplicata, totalizando doze tratamentos. Neste mesmo dia, foi reservado e acondicionado em sacos plásticos, o lodo para o outro

experimento, com o objetivo de preservar a sua umidade. O segundo experimento, com a cal virgem foi iniciado no dia 23/06/08, quando foram efetuadas novas misturas, nas mesmas concentrações, utilizando-se a cal virgem, segundo os mesmos procedimentos adotados no primeiro experimento.

Todos os tratamentos, correspondentes a 24 kg de lodo cada, foram acondicionados em sacos plásticos transparentes, identificados e dispostos ao tempo. Os sacos com os tratamentos foram mantidos abertos (figura 4.4.4) e nos dias com chuva, fechados apenas com uma dobra sustentada por um peso. Todos os tratamentos foram agrupados em dois espaços distintos, um para cada experimento, ordenados pelas repetições, dentro do leito de secagem (figura 4.4.5). A orientação do sol permitiu a projeção de sombra parcial da parede do leito nos dois tratamentos, sendo no experimento 1, para as repetições A no período da manhã e no experimento 2, no período da tarde, para as repetições “C”. As posições dos tratamentos no leito foram mantidas em todo o período da pesquisa.



Figura 4.4.4 Tratamentos do experimento 2



Figura 4.4.5 Tratamentos agrupados - experimentos 1 e 2

Os resultados de sólidos totais das amostras coletadas nos dois dias da mistura da cal com lodo diferiram daquele observado anteriormente aos tratamentos que foi de 40% (valor médio de três amostras medidas no dia 19/06, de forma expedita pelo analisador Sartoris), exigindo ajustes e correções das concentrações teóricas de cal, inicialmente propostas. No dia 19/06, os resultados dos sólidos totais das testemunhas foram de 50,4%, 46,1% e 47,9%, e no dia 23/06 foram de 48,5%, 46,8% e 45,6%. Assim, as concentrações reais de cal dos tratamentos a serem avaliados em função da concentração de sólidos totais média (47,55%), passaram a ser de 12,6%, 21% e 29,4%, como apresentado no quadro 4.4.2.

Quadro 4.4.2 Concentrações propostas e reais de cal virgem e de cal hidratada utilizadas no processo de higienização de lodo anaeróbio de esgoto sanitário.

Concentração de cal proposta (%)	Massa de lodo (kg)	ST proposto (40% ST) (kg)	Cal utilizada (kg)	ST real (47,55% ST) (kg)	Concentração de cal utilizada (%)
15	72	28,8	4,3	34,24	12,6
25	72	28,8	7,2	34,24	21,0
35	72	28,8	10,1	34,24	29,4

Todo o estudo totalizou 144 amostragens, cujos delineamentos dos tratamentos estão apresentados no quadro 4.4.3.

Quadro 4.4.3 Delineamento dos tratamentos empregados no estudo para os experimentos 1 e 2.

Tipo de cal	Número do tratamento	Concentração da cal	Amostragens
Cal virgem	0	0	Amostragens com três repetições “A”, “B” e “C”, em 19/06 e após 15, 30, 60, 90 e 120 dias;
	1	12,6%	
	2	21%	
	3	29,4%	
Cal hidratada	4	12,6%	Amostragens com três repetições “A”, “B” e “C”, em 23/06 e após 15, 30, 60, 90 e 120 dias.
	5	21%	
	6	29,4%	
	7	0	

4.4.3 Registros dos valores de temperatura

Os parâmetros monitorados, no dia da mistura e aos 15, 30, 60, 90 e 120 dias após a mistura foram: coliformes termotolerantes e ovos totais e viáveis de helmintos com identificação das espécies, sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), SV/ST, pH e umidade.

Determinou-se que, no mínimo após 2 resultados consecutivos de ausência de ovos viáveis de helmintos, se encerraria a análise desse parâmetro.

Nos dias das coletas das amostras foram registradas as temperaturas do lodo, em cada tratamento, e a temperatura ambiente na hora e no local da coleta. Na rotina operacional da ETE foram também registrados pelos operadores as temperaturas ambiente de hora em hora no período diurno, à sombra, de 06:00 h às 18:00 h.

Nos tratamentos com a cal virgem as temperaturas do lodo foram observadas, a partir do momento da mistura, a cada 10 minutos até se atingir o valor de pico, e a partir daí de hora em hora, até as 18 horas.

Para os tratamentos com a cal hidratada, observaram-se as temperaturas somente durante as coletas das amostras. Os valores de temperatura foram registrados, por um termômetro de escala 0°C a 60°C.

4.4.4 Registros dos valores de pH

Os valores de pH foram observados durante todo o período de estocagem dos experimentos, sendo os primeiros registros realizados imediatamente após a mistura do lodo com a cal, 2 e 22 horas após. Os demais valores de pH foram registrados durante as coletas das amostras, aos 15, 30, 60, 90 e 120 dias.

4.4.5 Plano de coletas de amostras para análises laboratoriais

As amostras para as análises foram coletadas, no período da manhã, segundo o calendário pré-estabelecido, iniciando-se em 19/06/08 e encerrando em 21/10/08. Foi utilizado o amostrador de montes e pilhas do tipo “Trier”, que também é utilizado para amostragem de solo, conforme NBR 10.007 (ABNT, 2004).

Nas coletas, o amostrador foi cravado no lodo dentro do saco, um pouco inclinado até atingir o fundo. Fazia-se uma ligeira rotação para possibilitar a coleta do material em toda a profundidade do saco. Retirava-se então, várias alíquotas de lodo até se atingir os volumes necessários, que foram acondicionados em potes com tampa, em amostras de no mínimo um litro.

As amostras foram conservadas em gelo, para preservação, e encaminhadas para o Laboratório Central de Esgotos da Saneago e, no mesmo dia, no período da tarde, iniciavam-se os procedimentos de análise.

O quadro 4.4.4 apresenta o calendário de coletas das amostragens. As figuras 4.4.6 e 4.4.7 mostram o amostrador e a operação de retirada de uma alíquota de lodo de um dos tratamentos.



Figura 4.4.6 Amostrador do tipo “Trier” utilizado nas coletas de amostras



Figura 4.4.7 Amostragem de uma alíquota de lodo de um dos tratamentos

Quadro 4.4.4 Calendário de coleta das amostras de lodo dos experimentos 1 e 2

Data	Tempo de estocagem	Amostragens ⁽¹⁾
19/06/08	0 dia	4A, 4B, 4C, 5A, 5B, 5C, 6A, 6B, 6C, 7A, 7B e 7C
23/06/08	0 dia	0A, 0B, 0C, 1A, 1B, 1C, 2A, 2B, 2C, 3A, 3B e 3C
04/07/08	15 dias	4A, 4B, 4C, 5A, 5B, 5C, 6A, 6B, 6C, 7A, 7B e 7C
08/07/08	15 dias	0A, 0B, 0C, 1A, 1B, 1C, 2A, 2B, 2C, 3A, 3B e 3C
19/07/08	30 dias	4A, 4B, 4C, 5A, 5B, 5C, 6A, 6B, 6C, 7A, 7B e 7C
23/07/08	30 dias	0A, 0B, 0C, 1A, 1B, 1C, 2A, 2B, 2C, 3A, 3B e 3C
18/08/08	60 dias	4A, 4B, 4C, 5A, 5B, 5C, 6A, 6B, 6C, 7A, 7B e 7C
22/08/08	60 dias	0A, 0B, 0C, 1A, 1B, 1C, 2A, 2B, 2C, 3A, 3B e 3C
17/09/08	90 dias	4A, 4B, 4C, 5A, 5B, 5C, 6A, 6B, 6C, 7A, 7B e 7C
21/09/08	90 dias	0A, 0B, 0C, 1A, 1B, 1C, 2A, 2B, 2C, 3A, 3B e 3C
17/10/08	120 dias	4A, 4B, 4C, 5A, 5B, 5C, 6A, 6B, 6C, 7A, 7B e 7C
21/10/08	120 dias	0A, 0B, 0C, 1A, 1B, 1C, 2A, 2B, 2C, 3A, 3B e 3C

⁽¹⁾ O número representa o tratamento e a letra a repetição.

4.4.6 Caracterização das cales utilizadas nos experimentos

Foram realizadas análises laboratoriais da concentração de CaO da cal virgem e da cal hidratada, utilizadas nos experimentos. As amostras foram encaminhadas ao laboratório

da Secretaria de Indústria e Comércio do Estado de Goiás e os resultados do percentual de CaO para a cal virgem foi de 91% e para a cal hidratada foi de 70,8%.

4.4.7 Análises laboratoriais

As análises laboratoriais foram realizadas pelo Laboratório Central de Esgoto da Saneago, instalado na ETE Goiânia. Este laboratório é certificado pela NBR ISO 9001/2000 e faz parte da rede interlaboratorial da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (Abes). Os procedimentos analíticos seguem as recomendações do “Standard methods for examination of water and wastewater” da APHA/AWWA. Para as análises de coliformes termotolerantes foi utilizado o método dos tubos múltiplos. Para as análises parasitológicas foi utilizado o método de Yanko modificado. Essa metodologia foi implantada pelo Laboratório de Esgotos da Saneago em 08/2004 após vários testes e pesquisas com outros métodos. A metodologia foi modificada e adaptada para atingir resultados satisfatórios, buscou-se o aprimoramento do método com a realização de pesquisas e visitas aos laboratórios da Sabesp e Copasa. No anexo A está apresentada a metodologia das análises.

4.4.8 Tratamento estatístico dos dados

Os dados foram analisados estatisticamente com a aplicação do teste F ao nível de significância de 5%. Foi utilizado o programa computacional do Statistical Analysis System - SAS. Cada experimento foi analisado separadamente, com vistas a verificar o efeito das variáveis dose (concentrações de cal da mistura) e tempo de estocagem. Posteriormente, foi realizada uma análise conjunta dos dados dos dois experimentos, com o objetivo de se verificar o efeito do tipo de cal. O resumo dos resultados estatísticos está apresentado no apêndice A.

4.4.9 Avaliações dos Custos

Na proposta de elaboração de uma estimativa de custos para a calagem do lodo com o uso de betoneira foram consideradas as seguintes condições:

- Sistema de pequeno porte com produção de lodo desaguado em leitos de secagem de 50 toneladas por mês;
- Concentração de sólidos totais do lodo em torno de 40%;

- Concentração de cal hidratada ou cal virgem de 20% MS do lodo;
- Pátio de estocagem do lodo previsto para até 60 dias de armazenamento, sendo 1 m² para 1,5 m³ de lodo, piso em concreto, cobertura em telhas amianto, pé direito de 4,0 m sem paredes laterais;
- Depósito de 15 m² para armazenamento da cal, virgem ou hidratada, em sacos de 20 kg;
- Betoneira para mistura do lodo com capacidade de 400 litros com motor de 2,0 cv;
- Para referência dos preços de construção civil e de mão de obra foram adotados os custos unitários da Saneago; custos da betoneira e da cal virgem e hidratada foram adotados segundo as cotações de mercado. Para os custos de energia foi considerado o custo de consumo referente à tarifa verde da Central Energética de Goiás (CELG) de R\$ 0,15236 o Kwh, incluídos desconto de 15%, PIS, Cofins e ICMS,
- No custo de mão de obra foram incluídos os valores relativos aos Equipamentos de Proteção Individual (EPI), adicional de insalubridade, vacinas, uniformes, leis sociais e ferramentas de uso (pá, enxada, garfo, jérica, carrinho de mão).

Foi estimado, separadamente, o custo fixo de implantação de uma estrutura civil e de equipamentos mínimos (pátio de estocagem, depósito de cal e betoneira) e o custo operacional envolvendo mão de obra, a cal e o consumo de energia.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos parâmetros monitorados são apresentados a seguir. Foram abordadas, inicialmente, algumas alterações das características físico-químicas do lodo relacionadas ao processo de higienização por meio da cal. Posteriormente são discutidos os resultados dos parâmetros bacteriológico e parasitológico do lodo, face à aplicação de diferentes dosagens de cal hidratada (experimento 1) e da cal virgem (experimento 2).

Os resumos dos resultados das análises estatísticas são apresentados no apêndice A. As diferenças apresentadas referem-se ao teste “F”, a 5% de probabilidade.

5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO LODO

5.1.1 Temperatura

Os dados das temperaturas do lodo e do ambiente foram plotados em gráficos, e apresentados nas figuras 5.1.1 e 5.1.2, para o experimento 1 e 2, respectivamente.

Para a construção dos gráficos foram adotadas, para a temperatura do lodo, as médias dos valores das 12 amostras representando os quatro tratamentos com três repetições cada um, por não se observar variações das temperaturas do lodo entre os diversos tratamentos, embora no primeiro dia da coleta isso não tenha ocorrido.

Para o experimento 1, no primeiro dia da coleta (19/06/08) as temperaturas registradas para os tratamentos sem cal, com 12,6%, 21% e 29,4% de cal hidratada, foram respectivamente, 27,5°C, 34,0°C, 33,5°C e 35,0°C.

Para o experimento 2, no primeiro dia da coleta (23/06/09) as temperaturas registradas para os tratamentos sem cal, com 12,6%, 21% de e 29,4% de cal virgem, foram respectivamente, 23,7°C, 35,0°C, 40,7 °C e 39,7 °C.

Nos tratamentos sem cal, não houve a ação de agitação do lodo na betoneira, ocorreu apenas a homogenização manual da amostra, em ambos os experimentos.

As temperaturas ambientes do gráfico também foram resultados das médias dos valores registrados no momento da coleta de cada tratamento.

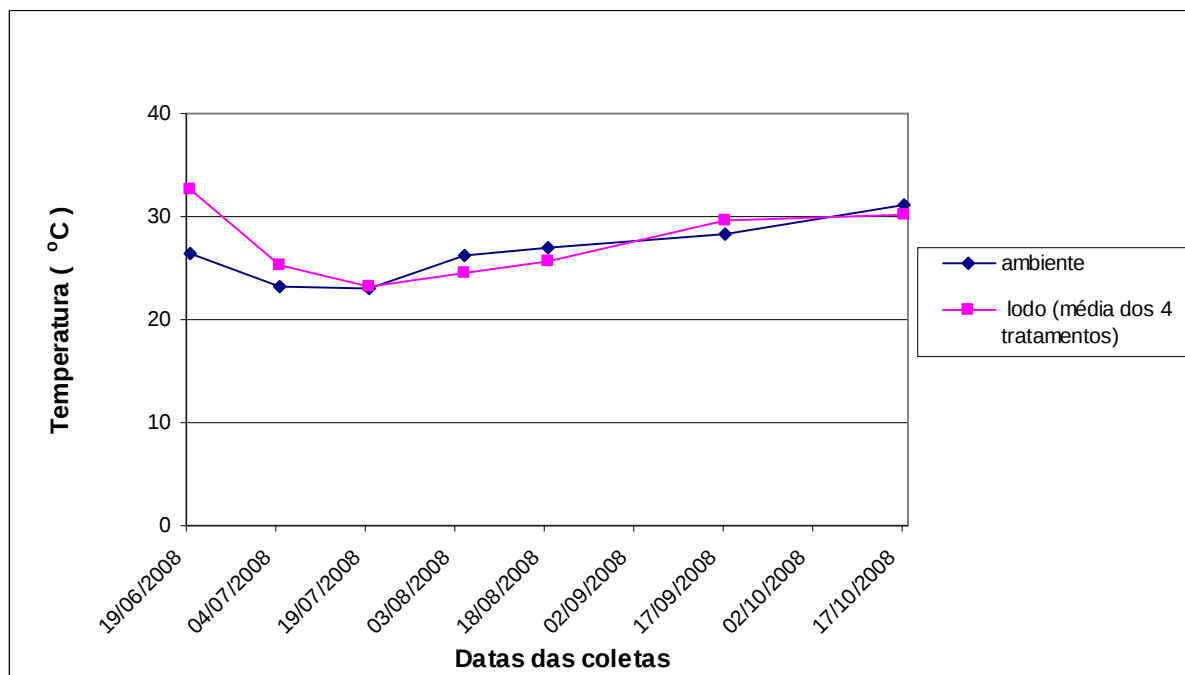


Figura 5.1.1 Temperaturas médias do ambiente e das amostras do lodo nos dias da coleta – experimento 1

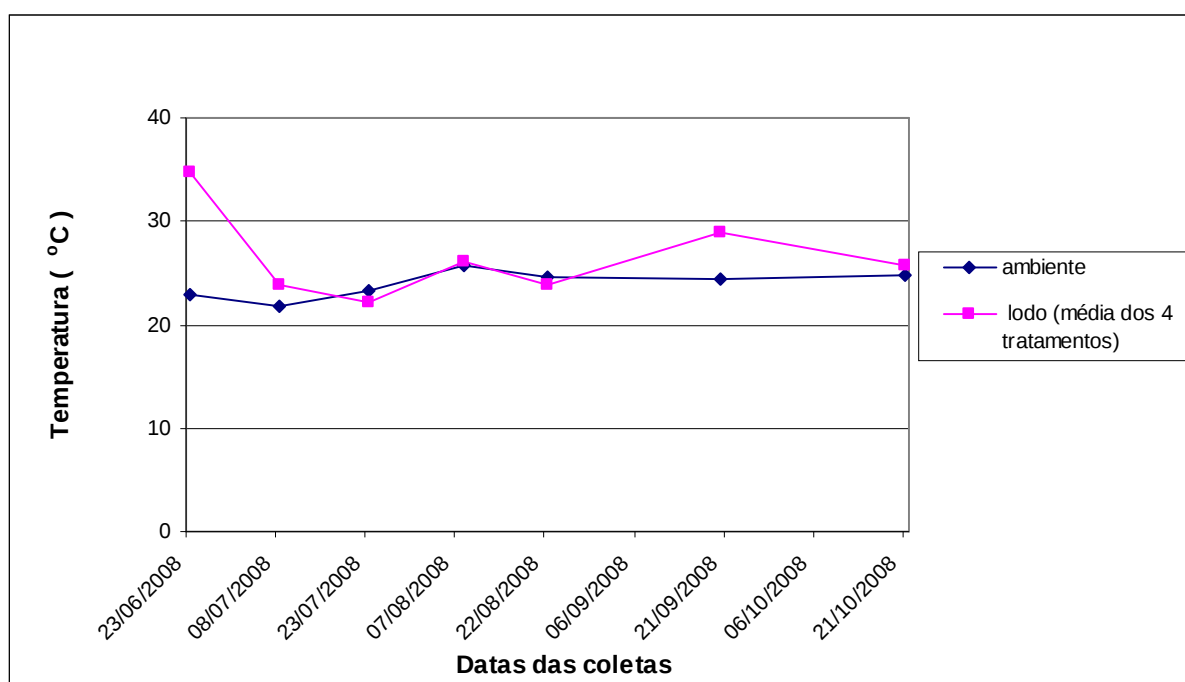


Figura 5.1.2 Temperaturas médias do ambiente e das amostras do lodo nos dias da coleta – experimento 2

Observa-se, nesses gráficos, que a temperatura do lodo evidenciou influência da temperatura ambiente, tendência também observada por outras pesquisas, como constataram Cherubini et al. (2002), avaliando a secagem e higienização do lodo anaeróbio em leitos de secagem mediante a solarização. Na figura 5.1.2, observou-se um valor de temperatura do lodo, no dia 21/09, acima do valor da temperatura ambiente, fato que se justifica pela

conservação das altas temperaturas ambiente registradas nos 20 dias anteriores do mês de setembro, com médias diurnas entre 26°C a 28°C.

Observou-se que as temperaturas do lodo caleado nas primeiras coletas de amostras, que ocorreram logo após as misturas do lodo com as cales, em ambos os experimentos, apontaram valores superiores às temperaturas ambiente registradas. Esse fato já era esperado em função da reação da cal com a umidade do lodo, no experimento 2, com a cal virgem. Atribui-se também, ao aumento dessas temperaturas, a influência da energia cinética da mistura lodo-cal.

O aumento de temperatura nos tratamentos do experimento 2, com a cal virgem, atingiu níveis bem significativos em curtos intervalos de tempo, o que não aconteceu nos tratamentos do experimento 1, com a cal hidratada.

As variações das temperaturas do lodo do experimento 2, logo após a mistura do lodo com a cal virgem foi objeto da construção de um gráfico específico (figura 5.1.3). Foram registrados valores de temperatura do lodo, inicialmente, a cada 10 min até atingir o valor de pico e posteriormente até as 18 horas, de hora em hora. Esses dados foram organizados em intervalos de hora e apresentado na figura 5.1.3.

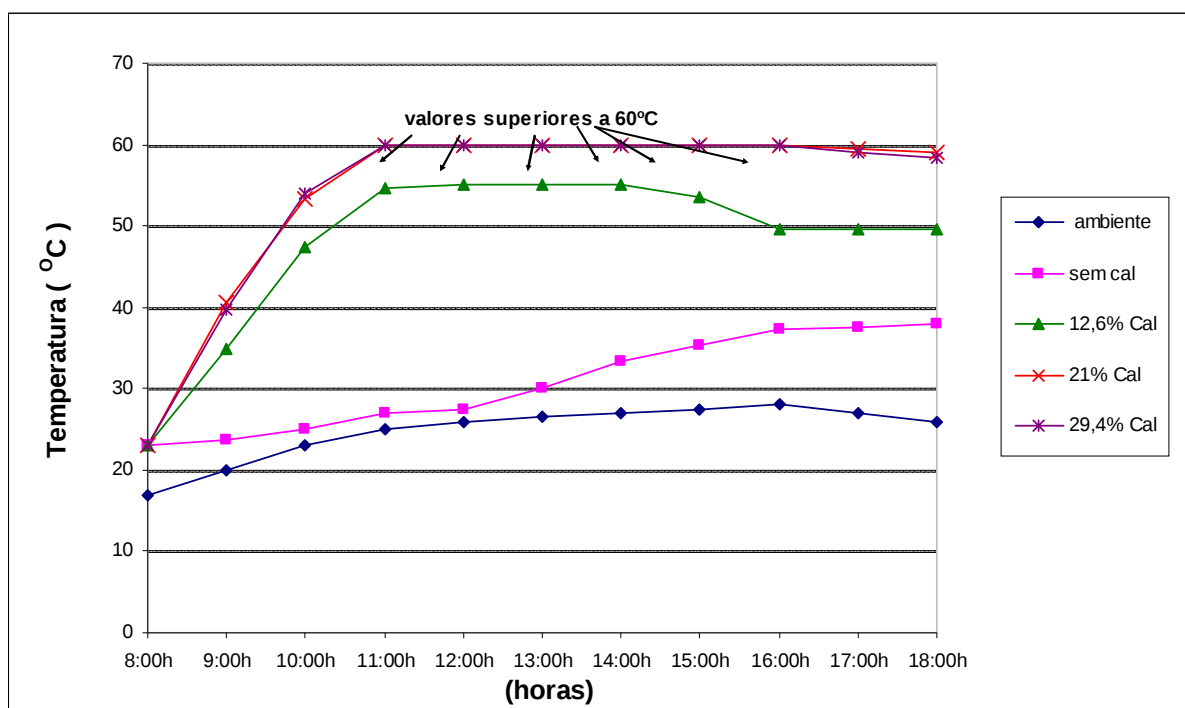


Figura 5.1.3 Temperaturas do lodo registradas após mistura com cal virgem – experimento 2

Conforme apresentado na figura 5.1.3, para os tratamentos com cal virgem nas concentrações de 21% e 29,4%, após 2 horas da mistura, as temperaturas do lodo atingiram picos superiores a 60°C, não registrados pelos termômetros, que possuíam escala máxima de

60°C. Essas temperaturas médias, superiores a 60°C, permaneceram por 5 horas. Como não houve registros de temperatura no período noturno, os valores das temperaturas observadas no dia seguinte à higienização do lodo com a cal virgem, dia 24/06/08, estão apresentados no quadro 5.1.1.

Quadro 5.1.1 Temperaturas ambiente e temperaturas médias do lodo dos tratamentos do experimento 2 no dia seguinte da calagem do lodo com a cal virgem (dia 24/06/08).

Horário	Temperaturas (°C)			
	Ambiente	12,6% Cal	21% Cal	29,4% Cal
08:00	18	32	34	32
10:00	24	31	32	34
12:00	27	32	32	35
14:00	29	32	32	36
16:00	29	34	35	37
18:00	24	35	36	37

Não foi objetivo deste trabalho, buscar o tempo para estabilização da temperatura nos diversos tratamentos após a calagem com a cal virgem. No entanto, observou-se que as temperaturas do lodo registradas no dia subsequente à calagem, conservaram o calor resultante da reação da cal. Este fato corrobora com Andreoli et al. (2001) que cita que após a calagem do lodo com a cal virgem, a temperatura se mantém elevada por alguns dias, dependendo da quantidade e qualidade da cal, até a mistura cal-lodo se estabilizar.

5.1.2 pH

Os registros do pH do lodo imediatamente após a calagem, 2 horas e 22 horas logo após a calagem, para os experimentos 1 e 2 estão apresentados nas figuras 5.1.4 e 5.1.5., respectivamente. Segundo a resolução Conama nº375 (CONAMA, 2006), a estabilização química do lodo é citada como um dos processos de redução da atratividade de vetores. A condição referida para esse processo é o critério da elevação do pH. A quantidade de álcali misturada com o lodo deve ser suficiente para que o pH seja elevado até pelo menos 12 por um período mínimo de 2 horas, permanecendo acima de 11,5 por mais 22 horas, sem que seja feita uma aplicação adicional de álcali. Os valores do pH são referenciados à temperatura de 25°C.

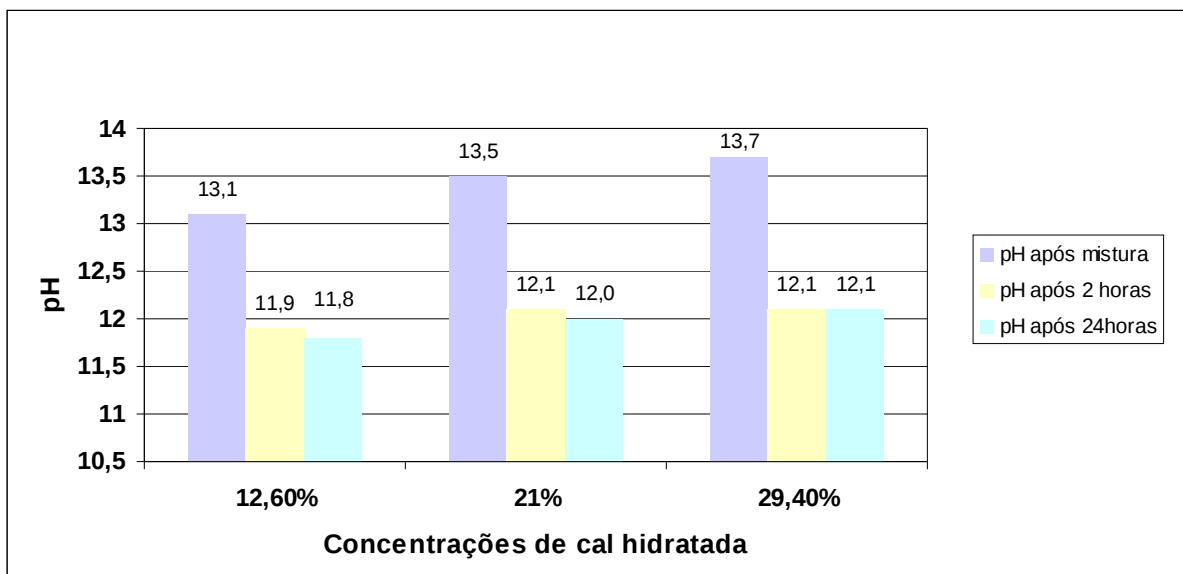


Figura 5.1.4 Comportamento do pH do lodo nas primeiras horas após a mistura com a cal hidratada - experimento 1

Os resultados de pH em ambos os experimentos conferem ao processo da calagem as condições para reduzir a atratividade de vetores em todos os tratamentos, exceto para o tratamento do experimento 1 com 12,6% de cal hidratada, que não atendeu à essa condição, embora apresentasse valores de pH após 2 e 22 horas, muito próximos de 12.

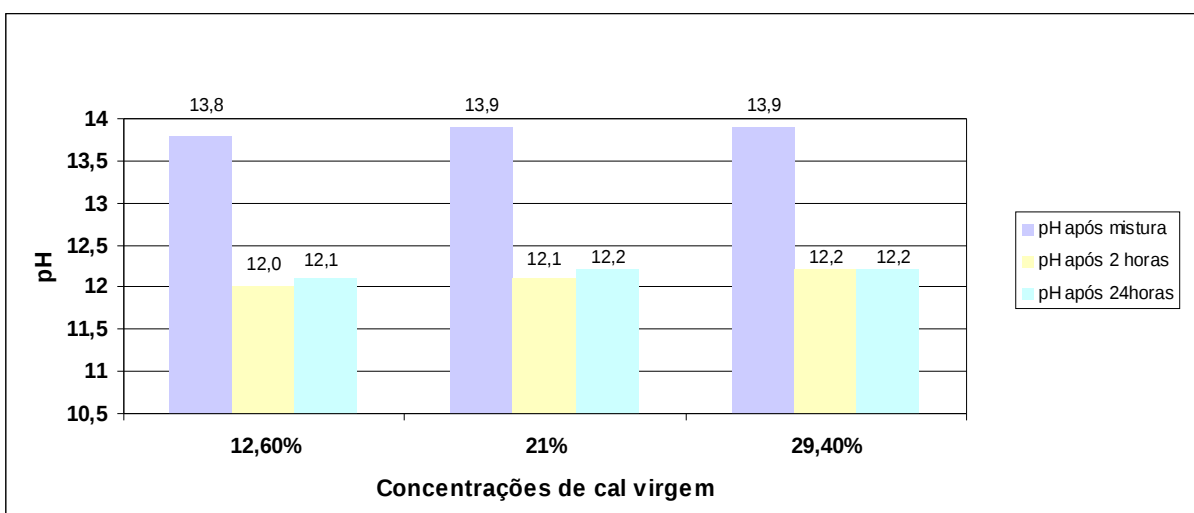


Figura 5.1.5 Comportamento do pH do lodo nas primeiras horas após a mistura do lodo com a cal virgem - experimento 2

O comportamento dos valores de pH, ao longo do tempo, para os experimentos 1 e 2 estão indicados nas figuras 5.1.6 e 5.1.7.

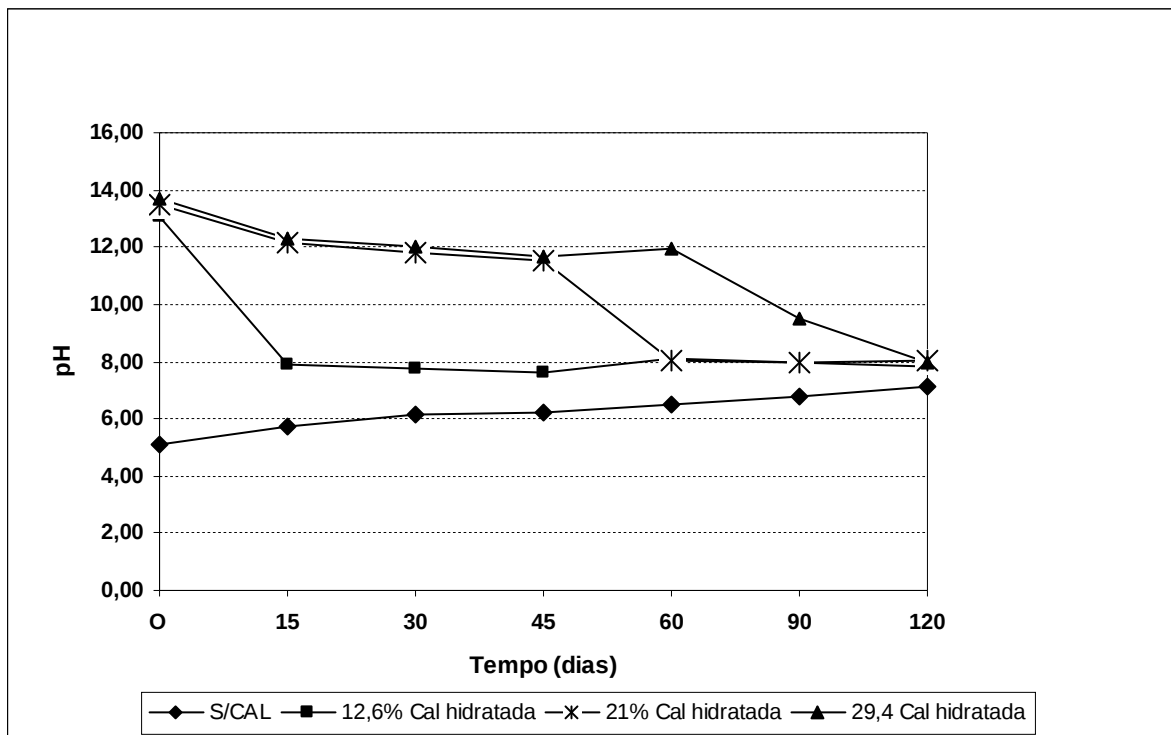


Figura 5.1.6 Comportamento do pH do lodo misturado às diferentes dosagens de cal hidratada ao longo do tempo - experimento 1

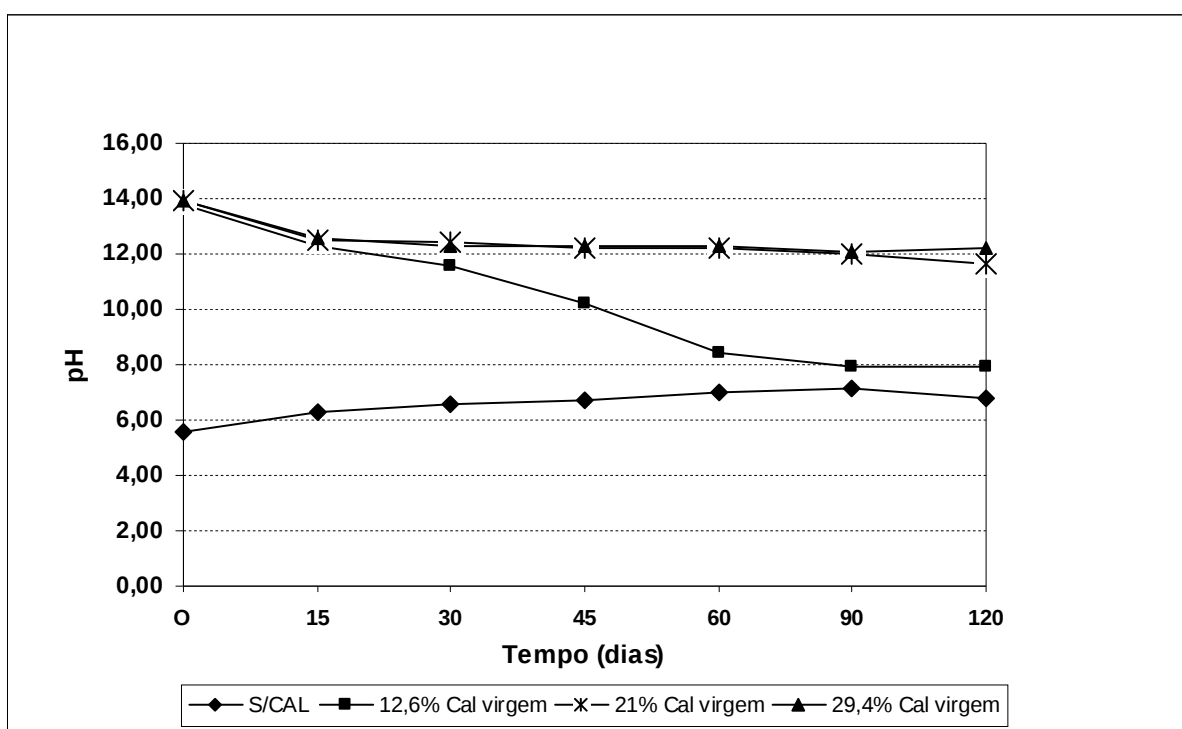


Figura 5.1.7 Comportamento do pH do lodo misturado às diferentes dosagens de cal virgem ao longo do tempo - experimento 2

Nos resultados representados nas figuras 5.1.6 e 5.1.7 observou-se que, em ambos os experimentos, tanto as dosagens como o tempo de estocagem e o tipo da cal tiveram efeito

significativo no comportamento do pH. Os valores máximos do pH ocorreram imediatamente após a mistura.

No experimento 1, durante o período de estocagem de 60 dias, apenas o tratamento com maior dosagem de cal hidratada, 29,4%, manteve o pH igual ou superior a 12. A concentração de 21% de cal hidratada manteve o pH nesses valores até aos 30 dias de estocagem, decaindo para o valor de 8 aos 60 dias de estocagem. O tratamento com menor dosagem de cal hidratada, 12,6%, apresentou uma queda expressiva no valor do pH em um tempo de 15 dias.

No experimento 2, o pH se manteve pouco acima de 12 por todo o período de estocagem, 120 dias, para o tratamento com 29,4% de cal virgem. Essa tendência foi acompanhada pelo tratamento com 21% de cal virgem, com valores ligeiramente inferiores a 12: 11,9 e 11,6 nos períodos de estocagem de 90 e 120 dias, respectivamente. Para o tratamento com 12,6% de cal virgem, houve uma expressiva queda do pH aos 30 dias.

Comparando-se os dois experimentos, a cal virgem se destacou por manter o pH em valores mais altos, nas duas maiores dosagens de cal virgem, de 21% e 29,4%, por um tempo maior (120 dias). No experimento com cal hidratada, isso foi possível por um período de até 30 dias para a dosagem de 29,4% de cal hidratada e 60 dias para a de 21% de cal hidratada. Conforme estudos realizados por Pegorini et al. (2006b), o tipo de cal utilizada em função de seu teor de CaO, tem influência direta no potencial de elevação e manutenção do pH do lodo. Como a cal virgem utilizada possui maior concentração de CaO comparada à cal hidratada, valores maiores de pH se mantiveram estáveis por um maior tempo, corroborando com estudo citado.

Em ambos os experimentos, ocorreram uma pequena elevação do pH no tratamento do lodo sem cal, durante o período de observação de 120 dias. A ocorrência de degradação da matéria orgânica ao longo do tempo confere o caráter básico ao lodo, elevando o pH.

5.1.3 Teor de umidade

A representação gráfica dos teores de umidade monitorada nas amostras extraídas para a realização das análises microbiológicas é apresentada na figura 5.1.8. Os valores correspondem às médias das três repetições de cada tratamento.

Logo após a mistura do lodo com as cales houve uma perda muito rápida de umidade nos primeiros 15 e 30 dias, principalmente nos tratamentos com a cal virgem, com

perdas dos teores de umidade de 7% a 16%, enquanto para os tratamentos com cal hidratada perdeu-se 3% a 7%.

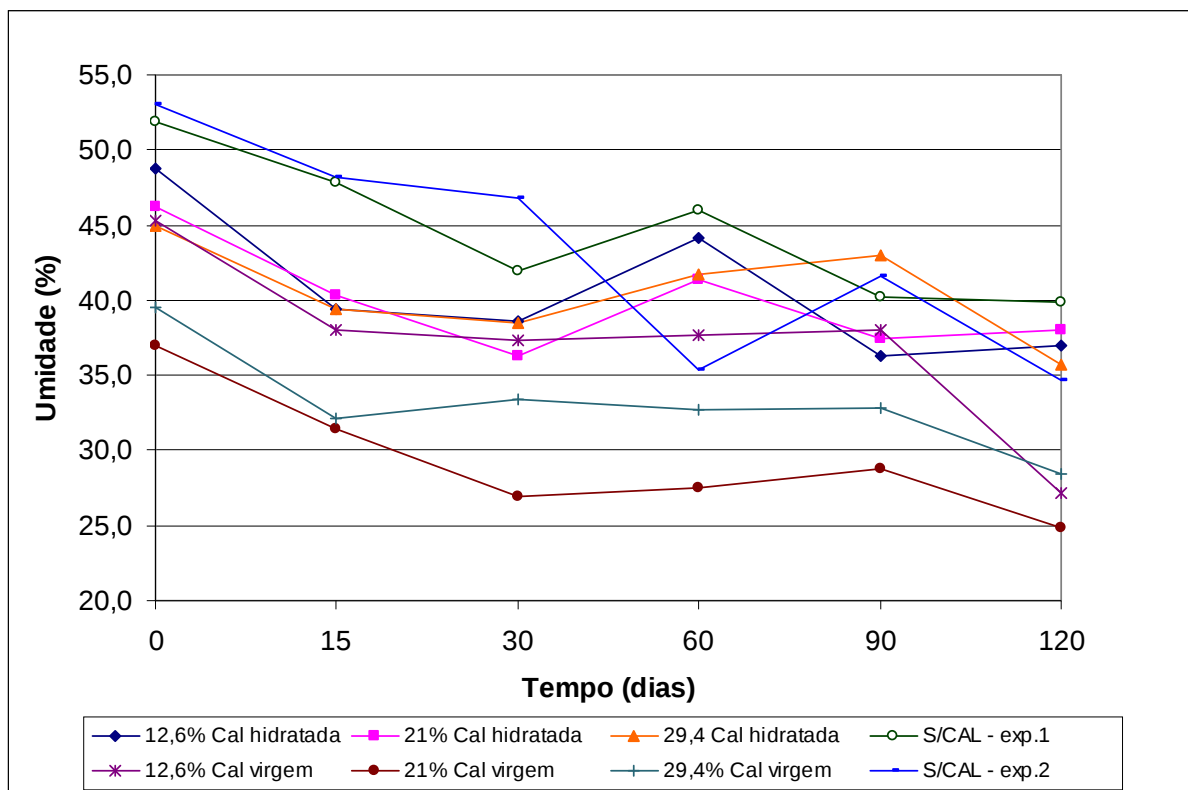


Figura 5.1.8 Teores de umidade dos tratamentos em função do tempo de estocagem

Ao longo do tempo houve uma sensível perda de umidade em todos os tratamentos, com variações de 8 a 18%, sendo as maiores perdas no tratamento com a cal virgem. As dosagens de cal utilizadas não interferiram significativamente para a perda de umidade, no experimento com a cal hidratada, todavia houve efeito para a cal virgem. A redução da umidade nos tratamentos com a cal é uma alteração resultante da adição de sólidos da cal e da precipitação de sólidos dissolvidos do lodo (ANDREOLI et al., 2001). A redução da umidade com o tempo em lodos em exposição prolongada ao sol é evidenciada também em pesquisa por Pegorini, Hartmann e Andreoli (2007). O acondicionamento do lodo em sacos plásticos contribuiu para atenuar a perda de umidade, fato desejável na pesquisa, pois as condições meteorológicas do período de estocagem somadas ao pequeno volume de lodo em cada tratamento (24 kg) influenciariam nos parâmetros microbiológicos avaliados.

A ocorrência de chuvas nos dias próximos aos da coleta em setembro e outubro, e mesmo nos dias da coleta (dias 21/09 e 21/10) não contribuíram para um possível aumento da umidade. Os lodos provenientes de leitos de secagem possuem teores de umidade na faixa de

60% até 20%. Nos dois experimentos realizados as umidades iniciais foram de 53% e 51,9% para os tratamentos com cal virgem e cal hidratada, respectivamente.

5.1.4 Sólidos Voláteis (SV) e Sólidos Totais (ST)

As concentrações de sólidos voláteis em relação aos totais sofreram efeito do tempo de estocagem e das dosagens de cal para ambos os experimentos. O quadro 5.1.2 apresenta os valores médios dos sólidos voláteis em relação aos sólidos totais para os tratamentos com a cal hidratada (experimento 1) e com a cal virgem (experimento 2).

Quadro 5.1.2 Concentrações de Sólidos voláteis em relação aos Sólidos totais para os experimentos 1 e 2

SV/ST (%) ⁽¹⁾						
Tratamentos	Tempo (dias)					
	0	15	30	60	90	120
Experimento 1						
S/CAL	43,57	39,77	37,33	40,17	30,07	37,90
12,6% Cal hidratada	33,20	34,43	34,37	39,20	30,63	33,43
21% Cal hidratada	30,23	35,43	33,40	34,63	27,07	30,77
29,4% Cal hidratada	33,87	32,63	32,83	31,73	28,37	31,50
Experimento 2						
S/CAL	44,27	38,00	38,47	39,47	37,17	36,93
12,6% Cal virgem	35,83	35,47	35,50	34,27	35,13	32,47
21% Cal virgem	29,80	31,83	29,60	37,17	35,13	34,93
29,4% Cal virgem	26,17	25,90	27,63	31,50	29,97	30,27

⁽¹⁾ Valores médios de três repetições

As relações entre sólidos voláteis e totais (SV/ST) dos tratamentos apresentaram comportamentos semelhantes, com valores decrescentes ao longo do tempo. Os tratamentos com adição de cal apresentaram valores menores da relação SV/ST, comparados aos tratamentos sem cal. Alguns autores relatam que a estabilização com cal não reduz sólidos voláteis, somente alteram as características físicas e químicas do lodo. No entanto essa pequena redução dos sólidos voláteis em relação aos totais, também constatado por Lima et al. (2007) em sua pesquisa com lodos submetidos à secagem e higienização com cal em estufas agrícolas, pode ser atribuída a uma oxidação química da matéria orgânica presente no

lodo pela elevação do pH, resultando na diminuição dessa relação. Andreoli et al. (2001) cita a perda de orgânicos voláteis no lodo quando o pH no lodo é aumentado. Os resultados de sólidos voláteis não foram influenciados pelo tipo de cal, já as dosagens influenciaram diretamente os valores de SV, sendo os valores de SV decrescentes na medida dos aumentos das dosagens de cal, pelas razões já mencionadas. Os valores SV/ST em todos os tratamentos foram inferiores a 0,7, conforme estabelece a resolução Conama nº375 (CONAMA, 2006), evidenciando que o lodo estava bem estabilizado. Não se representou graficamente esse parâmetro pela pequena variação ao longo do tempo, em todos os tratamentos.

5.2 PARÂMETROS MICROBIOLÓGICOS E PARASITOLÓGICOS

As concentrações de coliformes termotolerantes e ovos viáveis de helmintos foram monitorados de acordo com a proposta do plano de amostragem. No entanto, observou-se um aumento de coliformes nas amostras tratadas com cal aos 15 e 30 dias após a mistura. Para acompanhar essa evolução, acrescentaram-se análises aos 45 dias, excepcionalmente para o parâmetro dos coliformes termotolerantes.

5.2.1 Coliformes Termotolerantes

Houve efeito significativo do tempo de estocagem, das dosagens e do tipo de cal aplicadas ao lodo no decaimento das concentrações de coliformes em todos os tratamentos dos dois experimentos.

As concentrações médias de coliformes nos lodos sem adição de cal, nos dias da higienização, foram de $2,80 \cdot 10^4$ e $2,85 \cdot 10^6$, respectivamente para o experimento 1 e 2. Esse último valor se encontra compatível com a faixa de 10^6 e 10^5 , indicadas por Feachem et al. (1983 apud COMPARINI, 2001), para os lodos digeridos. Para o experimento 1, a concentração de coliformes na ordem de 10^4 ocorreu em duas repetições, e a terceira apresentou valor na ordem de 10^5 . Embora a média dessas concentrações apresentasse valor de uma unidade logarítmica abaixo dos valores encontrados na literatura, registros do monitoramento do lodo seco da ETE Lages do ano de 2007 e 2008 apresentaram valores de coliformes termotolerantes na faixa de 10^4 . Observou-se também que concentração média de coliformes desse tratamento aos 15 dias e 30 dias apresentou valores na faixa de 10^5 e 10^6 , decaindo nos meses subsequentes.

Os valores de coliformes variam em diversas ordens de magnitude, sendo os resultados apresentados nos quadros 5.2.1 e 5.2.2 correspondentes à média geométrica das três repetições, para os tratamentos com cal hidratada e com a cal virgem, experimentos 1 e 2, respectivamente.

Quadro 5.2.1 Resultados de coliformes termotolerantes – experimento 1 (cal hidratada).

Data	Tempo	Coliformes Termotolerantes ⁽¹⁾ – NMP.gMS ⁻¹			
		s/cal	12,6% Cal	21,0% Cal	29,6% Cal
19/06	0 dia	$2,80.10^4$	$8,13.10^{-1}$	$3,30.10^{-1}$	$3,23.10^{-1}$
04/07	15 dias	$3,10.10^6$	$9,52.10^1$	$4,20.10^{-1}$	$2,90.10^{-1}$
19/07	30 dias	$6,90.10^5$	$1,63.10^1$	1,71	$2,62.10^{-1}$
04/08	45 dias	$1,10.10^5$	$1,38.10^2$	$1,21.10^1$	2,82
18/08	60 dias	$1,10.10^5$	3,98	$2,73.10^2$	$3,03.10^{-1}$
17/09	90 dias	$9,60.10^4$	$1,39.10^1$	$5,99.10^1$	$1,25.10^1$
17/10	120 dias	5,00	1,64	$6,32.10^{-1}$	1,04

⁽¹⁾ Valores referentes à média geométrica das três repetições

Quadro 5.2.2 Resultados de coliformes termotolerantes – experimento 2 (cal virgem)

Data	Tempo	Coliformes Termotolerantes ⁽¹⁾ – NMP.gMS ⁻¹			
		s/cal	12,6% Cal	21,0% Cal	29,6% Cal
23/06	0 dia	$2,85.10^6$	$3,23.10^{-1}$	$2,83.10^{-1}$	$2,90.10^{-1}$
08/07	15 dias	$3,03.10^6$	1,18	5,44	1,40
23/07	30 dias	$1,49.10^5$	$1,26.10^1$	2,10	1,80
08/08	45 dias	$1,23.10^5$	3,23	1,87	$4,20.10^{-1}$
22/08	60 dias	$1,58.10^4$	3,14	$2,47.10^{-1}$	$2,60.10^{-1}$
20/09	90 dias	$5,49.10^3$	1,35	$3,30.10^{-2}$	$4,2.10^{-2}$
21/10	120 dias	3,83	$8,71.10^{-1}$	$2,42.10^{-1}$	$2,5.10^{-1}$

⁽¹⁾ Valores referentes à média geométrica das três repetições

As concentrações de coliformes termotolerantes constantes nos quadros 5.2.1 e 5.2.2 também foram expressos nas figuras 5.2.1 e 5.2.2, relativos aos experimentos 1 e 2, respectivamente. Observa-se que em todos os tratamentos com cal se atingiu a concentração, recomendada pela resolução Conama nº 375 (CONAMA, 2006), de 1.000 NMP.g.MS⁻¹ para o lodo tipo A.

Observou-se que para os lodos sem adição de cal, o decaimento da concentração de coliformes foi lenta, atingindo valores para lodo tipo A somente após 120 dias, para ambos os experimentos.

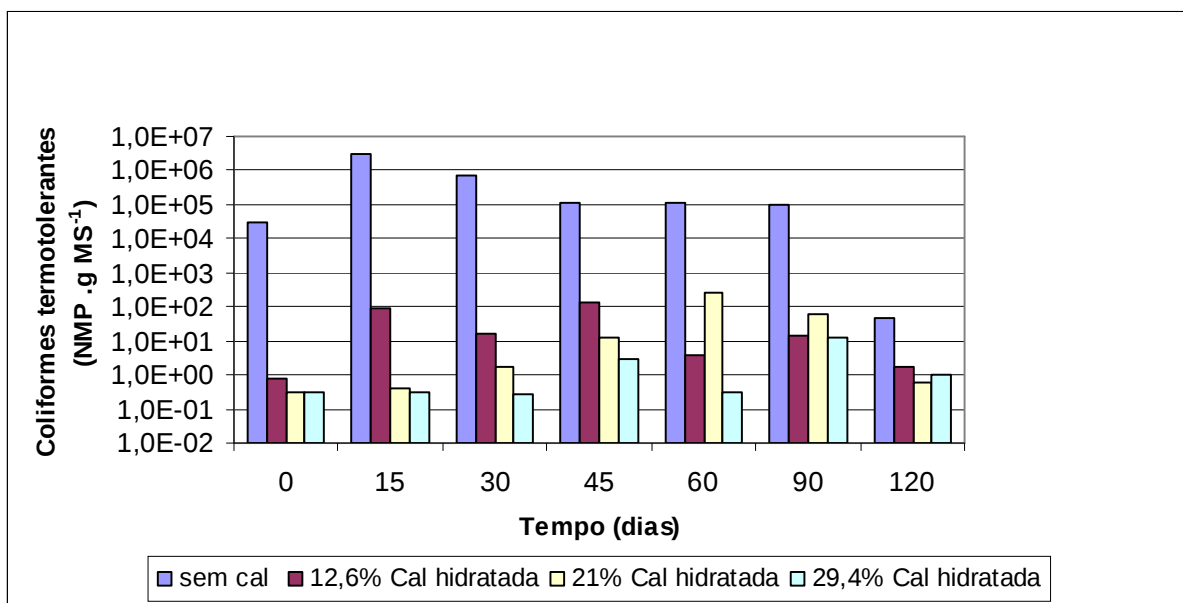


Figura 5.2.1 Concentrações médias de Coliformes Termotolerantes ao longo do tempo – experimento 1 (cal hidratada).

Observando-se o gráfico da figura 5.2.1, todas as concentrações médias de coliformes termotolerantes no tratamento com 12,6% de cal hidratada, observados no período de estocagem, foram superiores ao valor encontrado logo após a calagem com a cal hidratada. Esse comportamento se deve à maior taxa de crescimento dos coliformes observado aos 15 dias, associado à queda brusca do pH neste mesmo período. A partir do 15º dia, o pH se manteve em torno de 8, decaindo mais lentamente até atingir o valor de 7,10 aos 120 dias.

Ainda para o experimento 1, o crescimento acentuado dos coliformes aos 60 dias para o tratamento cuja dosagem foi de 21% de cal hidratada e 90 dias para o tratamento cuja dosagem foi de 29,4%, pode também estar associado à queda brusca do pH nessas dosagens nos mesmos períodos.

Passamani, Keller e Gonçalves (2002), em pesquisas com a higienização do lodo com a cal hidratada com dosagem de 30%, também evidenciaram o crescimento de coliformes com 30 dias de estocagem da mistura lodo cal, seguido da queda de pH. Na calagem com 40% de cal hidratada, os autores relataram que esse comportamento se deu aos 60 dias, e que nas dosagens de 50% e 60% não foi observado crescimento de coliformes.

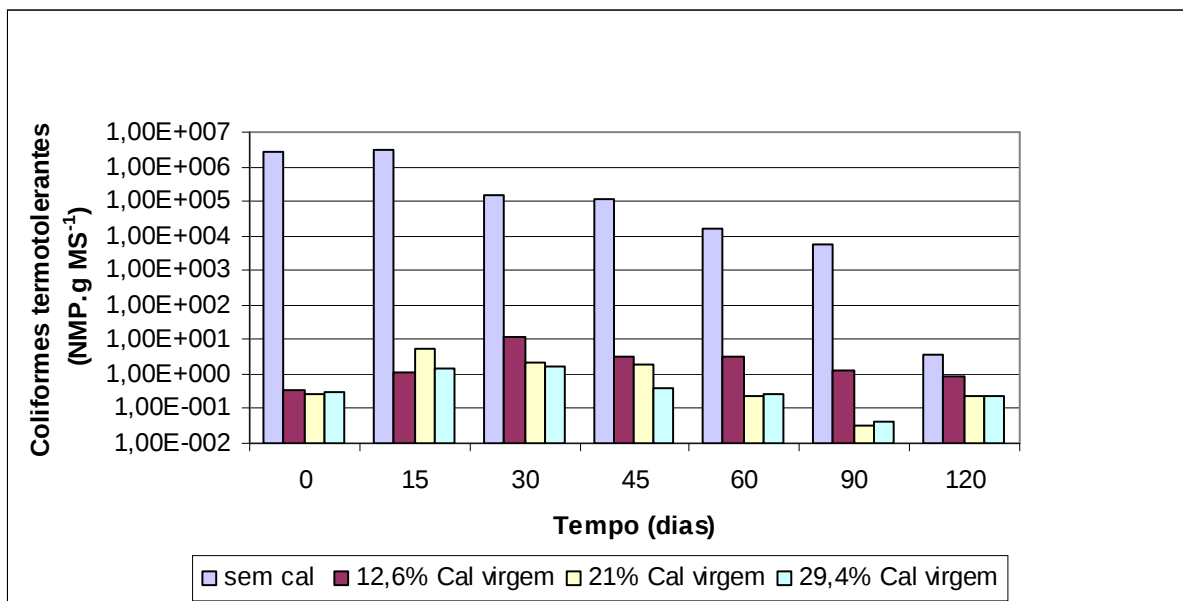


Figura 5.2.2 Concentrações médias de Coliformes Termotolerantes ao longo do tempo – experimento 2 (cal virgem).

Conforme a figura 5.2.2, do experimento 2, houve crescimento das concentrações de coliformes aos 15 e 30 dias no tratamento com 12,6% de cal virgem, correspondendo à queda nos valores de pH, principalmente aos 30 dias quando o valor ficou abaixo de 12. O crescimento das concentrações de coliformes aos 15 dias para os tratamentos cujas dosagens foram 21% e 29,4% de cal virgem, pode também estar relacionado à queda brusca do pH nesses mesmos períodos de tempo. Em termos percentuais, em todos os tratamentos com cal virgem houve 99,99% de eficiência de remoção de coliformes termotolerantes logo após a calagem e aos 120 dias, e a eficiência nos períodos de tempo intermediários, esteve entre 99,95% a 99,99%.

Outras pesquisas também evidenciaram crescimento de coliformes após o tratamento com cal. Segundo resultados da pesquisa realizada por Lima et al. (2008), em lodos caleados a 15% de cal (em peso seco), e dispostos em estufa agrícola para secagem, houve o recrescimento de coliformes no 14º dia, quando se constatou também o decaimento do pH de 11,5 para 8. Conforme Ramirez e Malina (1980 apud LIMA et al., 2008), caso o pH atinja valores inferiores a 11,5 é possível ocorrer a recolonização das bactérias. No contexto geral, esses aumentos das concentrações dos coliformes termotolerantes não foram tão expressivos, uma vez que todos os valores observados ao longo do tempo se mantiveram abaixo de 1.000 NMP.g.MS⁻¹, que é o limite estabelecido pela norma brasileira.

5.2.2 Ovos de helmintos

As concentrações de ovos totais e de ovos viáveis de helmintos presentes nos lodos foram monitoradas ao longo do tempo. Foi realizada a identificação das espécies dos ovos viáveis, sendo mais freqüentes os nematóides: *Áscaris sp*, *Toxocara sp*, e *Trichuris sp*. Os *Ascaris sp* foram as espécies predominantes em todas as amostras com ovos viáveis. Outra espécie, *Hymenolepis nana*, foi também observada, pelo fato de já ter sido presente em alguns resultados operacionais da ETE Lages, embora em percentuais mínimos 1,3% a 1,8% dos ovos viáveis totais (SANEAGO, 2008c). Os *Ancilostomas sp*, ausentes nos dados operacionais da ETE Lages, mas, segundo a literatura citado como freqüentes em lodos de esgotos, também foram observados, não tendo sido encontrados em nenhuma das análises. Possivelmente, a população atendida pela ETE não apresente doenças relacionadas à esse helminto ou, ainda, a sua sobrevivência no ambiente tenha sido relativamente pequena, porque são destruídos mais rapidamente que os ovos de *Ascaris*, segundo relatado por Comparini (2001).

Estudos realizados por Soccol et al. (1999 apud COMPARINI, 2001) em lodos provenientes de quatro ETE's do tipo UASB na região metropolitana de Curitiba (RMC), foram encontradas as seguintes espécies em percentuais: *Ascaris sp*. (85%), *Toxocara sp*. (5,5%), *Trichuris sp*. (4,5%), *Hymenolepis sp*. (3,7%) e *Taenia sp*. (0,4%).

Godinho, Chernicharo e Honório (2003) também relataram a predominância de *Ascaris sp*. em três tipos de lodos (87%, 70% e 80%), seguidos de *Toxocara sp*. (7%, 16% e 13%), *Hymenolepis sp*. (4%, 10% e 8%) e *Trichuris sp*. (0,8%, 0% e 0%), oriundos de três sistemas de tratamento de esgotos em diferentes escalas em Belo Horizonte.

Os quadros 5.2.3 e 5.2.4 apresentam os ovos viáveis por espécies para os tratamentos sem cal para os experimentos 1 e 2, respectivamente.

Conforme se observa no quadro 5.2.3, o resultado de ovos viáveis apresentado aos 15 dias de estocagem foi superior ao valor encontrado no dia "0". Considerando que esses microrganismos não se multiplicam no ambiente, esse aumento relativo poderia estar associado ao baixo percentual de recuperação dos ovos na análise das amostras do dia "0".

A presença de *Ascaris sp* variou de 53% a 99% dos totais de ovos viáveis para os valores apresentados do quadro 5.2.3 (experimento 1) e 84% a 100% para os valores apresentados do quadro 5.2.4 (experimento 2).

Quadro 5.2.3 Identificação das espécies dos ovos viáveis de helmintos do lodo sem cal, ao longo do tempo – experimento 1 (cal hidratada)

Tempo de estocagem	Espécies dos ovos viáveis de helmintos ⁽¹⁾ (nºovos.g MS ⁻¹)					
	1	2	3	4	5	Total
0 dia	9,50	0	0	0,08	0,00	9,58
15 dias	20,62	0	0	0,62	0,05	21,29
30 dias	7,61	0	0	0,20	0,07	7,88
60 dias	2,75	0	0	0,16	0,07	2,98
90 dias	0,47	0	0	0,13	0,00	0,60
120 dias	0,60	0	0	0,15	0,37	1,12

⁽¹⁾ Valores médios das três repetições: 1-*Ascaris sp.*, 2-*Ancilostoma sp.*, 3-*Hymenolepis nana*; 4-*Toxocara sp.* 5-*Trichuris sp.*

Quadro 5.2.4 Identificação das espécies dos ovos viáveis de helmintos do lodo sem cal, ao longo do tempo – experimento 2 (cal virgem).

Tempo de estocagem	Espécies dos ovos viáveis de helmintos ⁽¹⁾ (nºovos.g MS ⁻¹)					
	1	2	3	4	5	Total
0 dia	10,60	0	0	0,33	0,08	11,01
15 dias	8,06	0	0	0,24	0,12	8,42
30 dias	4,17	0	0,07	0,14	0	4,38
60 dias	0,63	0	0	0	0,06	0,69
90 dias	0,25	0	0	0	0	0,25
120 dias	0,32	0	0	0	0,06	0,38

⁽¹⁾ Valores médios das três repetições: 1-*Ascaris sp.*, 2-*Ancilostoma sp.*, 3-*Hymenolepis nana*; 4-*Toxocara sp.* 5-*Trichuris sp.*

Os valores das concentrações dos ovos de helmintos viáveis e inviáveis, valores médios das três repetições, para os diversas dosagens de cal ao longo do tempo, para os experimentos 1 e 2, foram apresentados nos quadros 5.2.5 e 5.2.6, respectivamente.

Observou-se que aos 15 dias, o tratamento com 21% de cal hidratada não apresentou ovos viáveis, o que não ocorreu no tratamento com 29,4%. Conforme relatado por Godinho, Chernicharo e Honório (2003), o fato de não ter encontrado ovos viáveis em uma determinada amostra não significa que eles não estivessem presentes no lodo, uma vez que a tomada de alíquotas para análise não garantem uma varredura de todo o espectro de ovos do lodo como um todo, mesmo com uma perfeita homogenização. Há de se considerar também que o método de análise de ovos de helmintos não garante a recuperação de 100% dos ovos existentes.

Quadro 5.2.5 Concentrações de ovos de helmintos viáveis e inviáveis ao longo do tempo - experimento 1 (cal hidratada).

Data	Tempo	Ovos de Helmintos (nº ovos.g.MS ⁻¹)							
		s/cal		12,6% Cal		21,0% Cal		29,4% Cal	
		Viáveis	Inviáveis	Viáveis	Inviáveis	Viáveis	Inviáveis	Viáveis	Inviáveis
19/06	0 dia	9,58	1,37	1,05	0,61	0,48	0,41	0,34	0,21
04/07	15 dias	21,29	5,71	1,59	1,21	0,00	0,16	0,17	0,19
19/07	30 dias	7,88	8,99	0,26	1,02	0,00	0,10	0,02	0,13
18/08	60 dias	2,98	5,42	0,41	0,72	0,00	0,74	0,00	0,09
17/09	90 dias	0,60	3,45	0,00	0,45	0,00	0,19	0,00	0,13
17/10	120 dias	1,12	1,77	0,00	0,00	-	-	-	-

Quadro 5.2.6 Concentrações de ovos de helmintos viáveis e inviáveis ao longo do tempo - experimento 2 (cal virgem).

Data	Tempo	Ovos de Helmintos (nº ovos.g.MS ⁻¹)							
		s/cal		12,6% Cal		21,0% Cal		29,4% Cal	
		Viáveis	Inviáveis	Viáveis	Inviáveis	Viáveis	Inviáveis	Viáveis	Inviáveis
23/06	0 dia	11,01	1,70	0,31	0,07	0,04	0,06	0,06	0,40
08/07	15 dias	8,42	8,90	0,00	0,15	0,00	0,04	0,00	0,07
23/07	30 dias	4,38	10,40	0,00	0,12	0,00	0,02	0,00	0,00
22/08	60 dias	0,69	2,90	0,00	0,52	0,00	0,10	0,00	0,02
20/09	90 dias	0,25	2,40	0,00	0,08	0,00	0,07	0,00	0,00
21/10	120 dias	0,38	1,00	-	-	-	-	-	-

Em ambos os experimentos houve o efeito significativo da dose e do tempo de estocagem nos resultados dos ovos viáveis de helmintos. Houve efeito também do tipo da cal, quando os resultados dos tratamentos do experimento 2, com a cal virgem, atingiram de imediato valores de ovos viáveis de helmintos inferiores ao valor limite (0,25 ovo.g MS⁻¹) recomendado pela resolução Conama nº375 (CONAMA, 2006) para o lodo tipo A. Isto se deve à ação da temperatura resultante da reação da cal virgem com o lodo, aumentando a eficiência da higienização, sendo que as maiores dosagens de cal virgem propiciaram a elevação da temperatura do lodo higienizado acima de 60°C, por cinco horas consecutivas.

Pode-se também atribuir esses melhores resultados dos tratamentos com a cal virgem à maior concentração de CaO (91%), comparada à cal hidratada (70,8%) utilizadas.

As figuras 5.2.3 e 5.2.4 representam os valores dos ovos viáveis de helmintos ao longo do tempo para os experimentos 1 e 2, respectivamente.

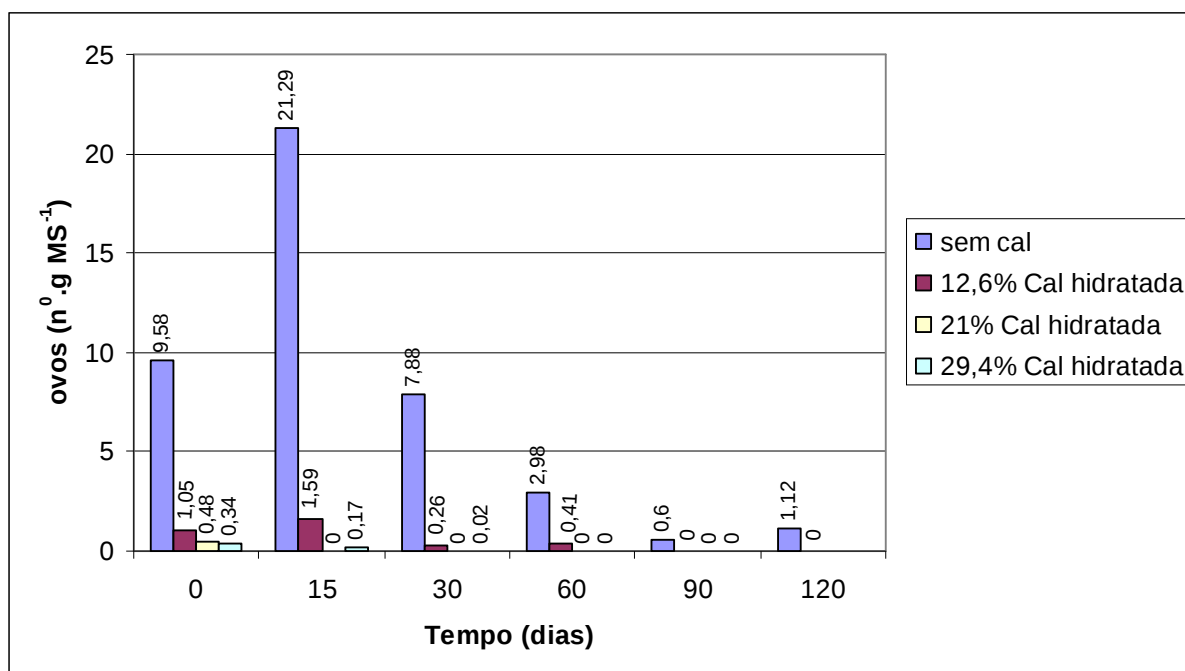


Figura 5.2.3 Concentrações de ovos viáveis de helmintos ao longo do tempo - experimento 1 (cal hidratada).

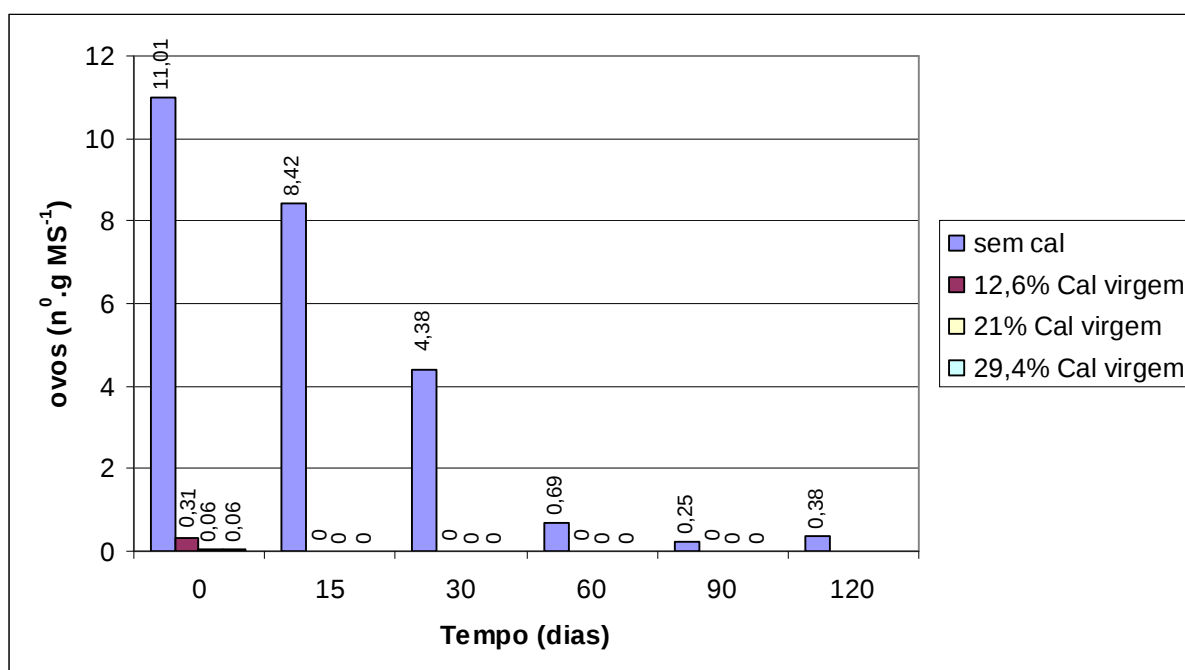


Figura 5.2.4 Concentrações de ovos viáveis de helmintos ao longo do tempo - experimento 2 (cal virgem).

Conforme apresentado na figura 5.2.3, para se atingir o limite da resolução Conama nº375, para lodo tipo A, foi necessário 15 dias para os tratamentos com 21% e 29,4% de cal e de 30 dias para o tratamento com 12,6% de cal. No período de 90 dias de observação, ocorreu a inativação de 100% dos ovos viáveis para todos os tratamentos com cal hidratada, quando se encerraram as análises desses tratamentos para ovos de helmintos.

Conforme apresentado na figura 5.2.4, foi atingido de imediato o limite da resolução Conama nº375, para lodo tipo A (0,25 ovos.g MS⁻¹) em todos os tratamentos com a cal virgem. No período de 15 dias de observação, ocorreu a inativação de 100% dos ovos viáveis para todos os tratamentos com cal virgem. A ETE Goiânia, na higienização do lodo primário desaguado por centrífugas com 33% ST, com cal virgem na concentração de 20%, alcança os limites de coliformes termotolerantes e ovos viáveis de helmintos estabelecidos para o lodo tipo B, segundo a resolução Conama nº375 (coliformes < 10⁶ e ovos viáveis de helmintos <10 ovos. g MS⁻¹) (SANT'ANNA, SILVA; SILVA, 2007).

O grau de inativação dos ovos viáveis de helmintos, obtido depois da estocagem do lodo tratado, depende do valor do pH inicial e do tempo de estocagem do lodo. Estudos realizados por Gaspard, Wiart e Schwartzbrod (1997) recomendam um tempo de 3 meses após a adição da cal ao lodo desaguado com pH acima de 12 para a inativação de patógenos.

Experiências relatadas por pesquisadores brasileiros recomendam a estocagem de 60 a 90 dias com a manutenção do pH acima de 12 (PINTO, 2001). Todavia, nesta pesquisa, foi necessário um tempo de 90 dias para o experimento 1 e 15 dias para o experimento 2, considerando 100% de inativação dos ovos em todos os tratamentos avaliados. Observou-se também que em ambos os experimentos, os tratamentos sem cal não atingiu o limite de 0,25 ovos.g MS⁻¹, em todo o período de observação (120 dias). Comparini (2001) em pesquisa que avaliou a estocagem de lodos em valas por um longo período, registrou concentrações de ovos viáveis de helmintos próximas de zero após 252 dias de estocagem.

Nos processos de higienização do lodo com cal utilizando a betoneira, a moagem é indispensável para garantir uma boa homogeneização e eficiência na desinfecção, considerando que em lodos desaguados por leitos de secagem, a umidade chega a variar de 60% a 65%. A falta de contato da cal com o lodo permite a manutenção de fontes de inóculo de diversos agentes patógenos no lodo (ANDREOLI et al., 2001). Os autores citam que no processo de calagem, quando o lodo com menos de 50% de umidade é introduzido na betoneira, formam-se torrões de difícil quebra, prejudicando assim a eficiência do tratamento. Este fato foi constatado na presente pesquisa, quando a umidade média do lodo utilizado foi de 52,55%. No entanto, nos procedimentos de coleta, evitaram-se amostras com torrões.

A necessidade de pesquisas regionalizadas para compatibilizar os resultados da higienização alcalina do lodo de esgoto com a realidade agrícola e econômica, considerando os aspectos geográficos, tipo de solo e clima da região é de fundamental importância para a reciclagem agrícola do lodo.

5.3 AVALIAÇÃO DOS CUSTOS

Os resultados das estimativas dos custos fixos (implantação) e variáveis (operacionais) para a calagem de um lodo com 40% ST, dosagem de cal de 20% MS em um sistema de pequeno porte, baixa mecanização, com produção de lodo em torno de 50 toneladas por mês, estão apresentados nos quadros 5.3.1 e 5.3.2, respectivamente.

Quadro 5.3.1 Estimativa dos custos de implantação de um sistema simplificado de calagem de lodo

Descrição	Valor de referência	Valor total para produção de 50 toneladas de lodo por mês
Pátio de estocagem (250 m ²)	R\$ 180,00 / m ²	R\$ 45.000,00
Depósito de cal (15 m ²)	R\$ 680,00 / m ²	R\$ 10.200,00
Betoneira (cap. 400 L)	R\$ 2.830,00	R\$ 2.830,00
Total custo fixo		R\$ 58.030,00

Quadro 5.3.2 Estimativa dos custos de operação de um sistema simplificado de calagem de lodo

Descrição	Valor de referência	Valor total por tonelada
Cal hidratada ou virgem	80 kg / ton.	R\$ 48,00
Mão de obra	6 horas / ton.	R\$ 36,40
Consumo de energia	0,50 kwh /ton.	R\$ 0,07
Total custo de operação		R\$ 84,73

Considerando a vida útil das instalações necessárias, pátio de estocagem e depósito de cal, de 20 anos e da betoneira de 15 anos pode-se atribuir, de forma simplificada, um custo fixo de implantação do sistema de calagem de R\$ 4,90 por tonelada de lodo. Com isso, o custo total aproximado da higienização do lodo, segundo os critérios e condições já mencionadas é de R\$ 89,37 a tonelada. Analisando esta composição de custos, observa-se que os maiores valores estão atribuídos ao custo da cal (54%) seguido pelos custos da mão de obra (40%). Este fato indica que pode ser vantajosa a implementação de algum sistema de mecanização em substituição à betoneira, com o objetivo de reduzir custos de mão de obra.

Nesta estimativa de custos não foi considerada diferença entre os custos de aquisição da cal hidratada e da cal virgem, foi adotado nesse estudo o custo médio de R\$ 0,60 por quilo de cal.

5.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Ao se avaliarem os custos da obtenção de um lodo apto a ser utilizado na agricultura, todo o processo de tratamento dos esgotos deve estar envolvido, desde a geração do lodo até a disposição final.

Embora o uso da cal virgem tenha se destacado em termos de eficiência na inativação dos patógenos em um tempo menor, comparado à cal hidratada, o uso desta última poderá ser viabilizado em sistemas que geram pequenos volumes de lodo, considerando a manipulação menos agressiva e a facilidade de obtenção da cal, somada a disponibilidade de área para estocagem do lodo higienizado.

Para a classificação do lodo higienizado como tipo A, segundo a resolução Conama nº357, e assim garantir a sua qualidade sanitária, análises complementares de Salmonellas e Vírus Entéricos deverão fazer parte do monitoramento do processo de higienização.

6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos na pesquisa, concluiu-se que:

Os tratamentos com a cal virgem obtiveram maior eficiência na elevação e manutenção de valores mais altos de pH, comparados aos tratamentos com a cal hidratada, durante todo o período de estocagem.

As maiores dosagens de cal virgem, 21% e 29,4% de cal, propiciaram a elevação da temperatura do lodo higienizado acima de 60°C, por cinco horas consecutivas.

A higienização do lodo com a cal virgem propiciou maior perda de umidade da mistura lodo cal, e de forma mais rápida.

As concentrações de coliformes termotolerantes dos tratamentos com cal dos experimentos 1 e 2 ao longo do tempo mantiveram abaixo do limite de NMP 1.000.g MS⁻¹, preconizado pela resolução Conama nº 375 para os lodos tipo A.

Considerando todas as dosagens de cal utilizadas, a remoção de ovos viáveis de helmintos foi mais eficiente para o experimento 2, com a cal virgem, onde se chegou a 100% de remoção aos 15 dias, enquanto que para o tratamento 1, com a cal hidratada, essa condição foi atendida aos 90 dias de estocagem.

Os limites para o atendimento à resolução Conama nº375, para lodos tipo A, segundo os parâmetros de coliformes termotolerantes e ovos viáveis de helmintos, foram atingidos de imediato para todas as dosagens utilizadas com a cal virgem. Para os tratamentos com a cal hidratada esse limite foi atingido aos 15 dias para as concentrações de 21% e 29,4% de cal e aos 90 dias para a menor dosagem, de 12,6% de cal.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, NBR 10.007, 2004b, 21 p.
- AISSE, M. M.; FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. Aspectos Tecnológicos e de processos. In: ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. **Reciclagem de Biossólidos – Transformando Problemas em Soluções**. Curitiba: Finep, 2001, 2.ed., cap.2, p. 49-119.
- ALÉM SOBRINHO, P. Tratamento de Esgoto e Geração de Lodo. In: TSUTIYA et al. **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: Abes, 2002, 2.ed., cap.2, p.7-40.
- ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F. Aspectos Metodológicos. In: ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. **Reciclagem de Biossólidos – Transformando Problemas em Soluções**. Curitiba: Finep, 2001, 2.ed., cap.1, p. 21-47.
- ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; CHERNICHARO, C. A. Secagem e higienização de lodos com reaproveitamento do biogás. In: CASSINI, S. T. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Projeto Prosab, Rio de Janeiro: Abes/RJ, cap.5, 2003, p.121-165.
- ANDREOLI, C. V. et al. Proposição de plano de monitoramento da reciclagem agrícola do lodo de esgoto no Estado do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997, Foz de Iguaçu. **Anais Eletrônicos**: Abes/PR, 1997, CD-ROM.
- ANDREOLI, C. V. et al. Higienização do lodo de Esgoto. In: **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição final**. Projeto Prosab, Rio de Janeiro: Abes/RJ, cap.4, p. 87-117, 2001.
- BARROS, I. T.; COSTA, A. C. S.; ANDREOLI, C. V. Avaliação da higienização de lodo de esgoto anaeróbio através do tratamento ácido e alcalino. **SANARE – Revista Técnica da Sanepar**, Curitiba, v.24, n.24, p.61-69, 2006.
- BARROS, K. K. et al. Desaguamento e estabilização alcalina de lodo anaeróbio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23, 2005, Campo Grande. **Anais Eletrônicos**: Abes/MS, 2005, CD-ROM.
- BITTENCOURT, S. et al. Uso Agrícola do Lodo de Esgoto - Estudo de caso da Região Metropolitana de Curitiba. In: SIMPÓSIO INTERAMERICANO DE BIOSSÓLIDOS, 5, Rio de Janeiro, 2008: **Anais Eletrônicos**: AIDIS, 2008, CD-ROM.
- BONNET, B. R. P.; LARA, A. I.; DOMASZAK, S. C. Indicadores biológicos de qualidade sanitária do lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V.; BONNET, B. R. P. **Manual de métodos para análises microbiológicas e parasitológicas em reciclagem agrícola de lodo de esgoto**. Curitiba: Sanepar, 2000, 2.ed., cap.1, p.11-26.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas**: 1961-1990. Brasília, DF, 1992. 84 p.

CANZIANI, J. R. F. et al. Aspectos socioeconômicos. In : ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. **Reciclagem de Biossólidos – Transformando Problemas em Soluções**. Curitiba: Finep, 2001, 2.ed., cap.4, p. 181-237.

CAPIZZI-BANAS, S. et al. Liming as an advanced treatment for sludge sanitization: helminth eggs elimination – *Ascaris* eggs as model. **Water Research**, 38, p. 3251-3258, 2004. Disponível em: <<http://www.elsevier.com>>. Acesso em: 21 fev. 2008.

CHRISTY, R. W. Sludge disposal using lime In: **Water Environment & Technology**. Washington, 1990. Disponível em: <<http://www.rdpotech.com/tch1wet.htm>>. Acesso em: 28 mar. 2008.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2007, 2.ed. 380 p.

CHERUBINI, C. et al. Avaliação de Parâmetros para Desinfecção e Secagem do lodo de Esgoto através da temperatura. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE MICROBIOLOGIA APLICADA AO SANEAMENTO, 1, 2000, Vitória, E.S. Disponível em: http://www.Sanepar.com.br/Sanepar/Gecip/Congressos_Seminarios/lodo_de_Esgoto.pdf>parâmetros_desinfecção.pdf

COMPARINI, J. B. **Estudo do decaimento de patógenos em biossólidos estocados em valas e em biossólidos submetidos à secagem em estufa agrícola**. São Paulo: Tese (Doutorado em Engenharia) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001, 278p.

COMPARINI, J. B.; ALÉM SOBRINHO, P. Redução nas concentrações de patógenos em biossólidos dispostos em valas por longo período. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22, 2003, Joinville, SC, **Anais Eletrônicos**: Abes/SC, 2003, CD-ROM.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº375: Ministério do Meio Ambiente, 2006, 32 p.

DE JÚLIO, M. D. Destinação final de lodo gerado em estações de tratamento de esgotos. In: Curso de Capacitação dos Engenheiros da Saneago / Abes, Goiânia, 2007, 42 p.

ERIKSEN, L.; ANDREASEN, P.; ILSOE, B. Inactivation of *Ascaris suum* eggs during storage in treated sewage sludge. **Water Research**, v.30, n.4, p. 1026-1029, 1995.

FERNANDES, F. et al. Reciclagem de lodo de esgoto – Experiência da Região Metropolitana de Curitiba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa, PB, **Anais Eletrônicos**: Abes/SC, 2001, CD-ROM.

FORESTI, E. et al. Fundamento do Tratamento Anaeróbio. In: CAMPOS, J. R. et al. **Tratamento de Esgotos Sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Projeto Prosab. Rio de Janeiro: Abes/RJ, 1999, cap. 2, p. 29-52.

GANTZER, C. et al. Monitoring of bacterial and parasitological contamination during various treatment of sludge. **Water Research**; v.35, n.16, p.3673-3370, 2001.

GASPARD, P.; WIART, J.; SCHWARTZBROD, J. Parasitological contamination of urban sludge used for agricultural purposes. **Waste Management e Research**; 15, p. 429-436, 1997.

GODINHO, V. M.; CHERNICHARO, C. A. L.; HONÓRIO, K. B. Caracterização de Lodos gerados em sistemas de tratamento de esgotos quanto à presença de helmintos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22, 2003, Joinville, SC, **Anais Eletrônicos**: Abes/SC, 2003, CD-ROM.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M. L.; VON SPERLING, M. V. Remoção da umidade de lodos de esgotos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. V.; FERNANDES, F. **Lodos de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2001, cap. 5, p. 159-259.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Contagem da população 2007. Disponível em: < [http:// www. ibge.gov.br/home/estatística/população/contagem2007.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatística/população/contagem2007.pdf) >. Acesso em: 30 mai. 2009.

IPEF. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. **Programa de biossólidos em plantações florestais (PROBIO)**. Disponível em: <<http://www.ipef.br/probio/>>. Acesso em: 019 ago. 2007.

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

JÚNIOR, I. V.; JORDÃO, E. R. F.; PAIXÃO, M. C. T. Caracterização qualitativa do lodo gerado por estações de tratamento de esgotos domésticos da região metropolitana do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa, PB, **Anais Eletrônicos**: Abes/SC, 2001b, CD-ROM.

KATO, M. T. et al. Configurações de Reatores Anaeróbios. In: CAMPOS, J. R. et al. **Tratamento de Esgotos Sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Projeto Prosab. Rio de Janeiro: Abes/RJ, 1999, cap. 3, p. 53-99.

LARA, A. I. Antecedentes. In: ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. **Reciclagem de Biossólidos – Transformando Problemas em Soluções**. Curitiba: Finep, 2001, 2.ed., 288 p.

LIMA, E. P. C. et al. Estudo da termoresistência de ovos de helmintos, coliformes termotolerantes e Escherichia coli. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23, 2005, Campo Grande, **Anais Eletrônicos**: Abes/MS, 2005, CD-ROM.

LIMA, M.R.P. et al. Lodo de Esgoto – Melhoria das suas características para Disposição na Agricultura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24, 2007, Belo Horizonte, MG, **Anais Eletrônicos**: Abes/MG, 2007, CD-ROM.

LIMA, M.R.P. et al. Avaliação da qualidade do lodo de Esgoto quando submetido à secagem / Higienização em estufa agrícola. In: SIMPÓSIO INTERAMERICANO DE BIOSSÓLIDOS, 5, 2008, Rio de Janeiro, **Anais Eletrônicos: AIDIS**, 2008, CD-ROM.

LUDUVICE, M. Processos de estabilização de lodos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. V.; FERNANDES, F. **Lodos de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2001, cap. 4, p. 123-157.

MACHADO, M. F. S. **A situação brasileira dos bioossólidos**. Campinas: Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2001, 282 p.

MALTA, L. R. S.; TSUTIYA, M. T. Otimização da estabilização cálcica do bioossólido produzido na ETE Lavapés de São José do Campo / SP, para uso agrícola. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22, 2003, Joinville, SC, **Anais Eletrônicos: Abes/SC**, 2003, CD-ROM.

METCALF, EDDY. Inc. **Wasterwater Engineering Treatment, Disposal and Reuse**. 3 ed. New York: McGraw-Will, 1991, 3 ed., 1334 p.

MUHS, G. P. The design and cost of class A and B treatment of biosolids using post-lime stabilization and pasteurization. RDP Technologies, Inc. Disponível em: <www.rdpotech.com/tch11ab.htm>. Acesso em: 28 mar. 2008.

NASCIMENTO, R. S. et al. Estabilização Anaeróbia de Lodo em Reatores do tipo UASB. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa, PB, **Anais Eletrônicos: Abes/PB**, 2001, CD-ROM.

NETO, C. O. A.; CAMPOS, J. R. Introdução. In: CAMPOS, J. R. et al. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Projeto Prosab. Rio de Janeiro: Abes/RJ, 1999, cap. 1, p. 1-28.

OBSERVATÓRIO DAS METRÓPOLES. Disponível em < www.observatoriodasmetrolopes.ufrj.br/como_anda/como_anda_rm_Goiania.pdf>.

PASSAMANI, F. R. F.; KELLER, R.; GONÇALVES, R. F. Higienização de lodo utilizando caleagem e pausterização em uma pequena Estação de Tratamento de Esgotos combinando reator UASB e biofiltro aerado submerso. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 28, Cancun, 2002: **Anais Eletrônicos. AIDIS**, 2002, CD-ROM.

PATRI, M. P. M. Legislación sobre lodos em américa latina: un análisis comparativo. In: SIMPÓSIO INTERAMERICANO DE BIOSSÓLIDOS, 5, 2008, Rio de Janeiro, **Anais Eletrônicos: AIDIS**, 2008, CD-ROM.

RAMOS, R. et al. Estudo da otimização do sistema de tratamento de lodos de esgotos estabilizados química e termicamente visando a reciclagem agrícola. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24, 2007, Belo Horizonte, **Anais Eletrônicos: Abes/MG**, 2007, CD-ROM.

PEGORINI, E. S. et al. Aperfeiçoamento do processo de higienização através da caleação: I potencial de pausterização. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 8, 2006, Fortaleza, **Anais Eletrônicos**. Fortaleza: Abes, 2006a. CD-ROM.

PEGORINI, E. S. et al. Aperfeiçoamento do processo de higienização através da caleação: II potencial de alcalinização prolongada. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 8, 2006, Fortaleza, **Anais eletrônicos**. Fortaleza: Abes, 2006b. CD-ROM.

PEGORINI, E. S.; HARTMANN, C. M.; ANDREOLI, C. V. Avaliação do processo de higienização do lodo de esgoto em estufas plásticas instaladas em ETE's da Sanepar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24, 2007, Belo Horizonte, **Anais Eletrônicos**: Abes/MG, 2007, CD-ROM.

PECSON, M. B. et al. The effects of temperature, pH, and ammonia concentration on the inactivation of *Ascaris* eggs in sewage sludge. **Water Research**, 41, p. 2893-2902, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 12 mar. 2008.

PEIXOTO, J. I. G. et al. Secagem e higienização natural do biossólido gerado na estação de tratamento de esgotos de Brasília Sul (ETE Sul). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23, 2005, Campo Grande, MS. **Anais Eletrônicos**. Abes/MS, 2005, CD-ROM.

PINTO, M. T. Higienização de lodos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. V.; FERNANDES, F. **Lodos de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2001, cap. 6, p. 261-297.

POGGIANI, F.; SILVA, P. H. M.; GUEDES, M. C. Uso do lodo de esgotos em plantações florestais. In: ANDREOLI, C. V. et al. **Bioossólidos – alternativas de uso de resíduos de saneamento**. Projeto Prosab. Rio de Janeiro: Abes/RJ, 2006, cap. 6, p. 159-188.

REAMI, L.; COMPARINI, J. B. Produzindo fertilizantes na ETE Franca. In: SIMPÓSIO INTERAMERICANO DE BIOSSÓLIDOS, 5, 2008, Rio de Janeiro, **Anais Eletrônicos: AIDIS**, 2008, CD-ROM.

SANEAGO. Saneamento de Goiás S.A. **Relatório Operacional da ETE Goiânia**. Goiânia, 2008a.

_____. **Boletim de Informações da Assessoria de Planejamento**. Goiânia, 2008b.

_____. **Dados operacionais da ETE Lages**. Goiânia, 2008c.

_____. **Projeto do Sistema de Esgotamento Sanitário da sub-bacia Lages em Aparecida de Goiânia**. Goiânia, 2001a.

_____. **Manual de operações da ETE Lages**. Goiânia, 2001b.

SILVA, M. Situação atual e perspectivas futuras para o gerenciamento do lodo gerado na Estação de tratamento de esgotos de Brasília Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23, 2005, Campo Grande, MS, **Anais Eletrônicos**: Abes/MS, 2005, CD-ROM.

SILVA, S. M. C. P. et al. Principais contaminantes do lodo. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. V.; FERNANDES, F. **Lodos de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2001, cap. 3, p. 69-121.

SOARES, S. R. A.; MATOS, Z. M. R.; BERNARDES, R. S. Modelagem do processo de desidratação de lodo anaeróbio em leitos de secagem simulados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.2, p. 313-319, 2001, Campina Grande, PB. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br>>. Acesso em: 28 mar. 2008.

SANT 'ANNA, M. P.; SILVA, M. O. S. A.; SILVA, M. F. Desidratação e Estabilização Alcalina do lodo Primário da ETE Goiânia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24, 2007, Belo Horizonte, MG, **Anais Eletrônicos: Abes/MG**, 2007, CD-ROM.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br>>. Acesso em 30 mai.2009.

USEPA. United States Environmental Protection Agency - **Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge** – Under 40 CFR Part 503, 2003.

VAN HAANDEL, A.; ALÉM SOBRINHO, P. Produção, Composição e Constituição de Lodo de Esgoto. In: ANDREOLI, C. V. et al. **Biossólidos – alternativas de uso de resíduos de saneamento**. Projeto Prosab. Rio de Janeiro: Abes/RJ, 2006, cap. 3, p. 29-48.

VAN HAANDEL, A. Potencial de geração de energia a partir do lodo de sistema de tratamento de esgotos. In: SIMPÓSIO INTERAMERICANO DE BIOSSÓLIDOS, 5, 2008, Rio de Janeiro, **Anais Eletrônicos: AIDIS**, 2008, CD-ROM.

VILASBOAS, E. S.; ZIELINSKI, R. P. Gestão do lodo de esgoto na Sanepar. **SANARE – Revista Técnica da Sanepar**, Curitiba, Jan/Dez 2005, v.23, n.3, p. 48-63.

VON SPERLING, M. V. **Introdução à qualidade da água e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2005, 3. ed., 452 p.

VON SPERLING, M. V.; GONÇALVES, R. F. Lodos de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. V.; FERNANDES, F. **Lodos de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2001, cap. 2, p. 17-68.

VON SPERLING, M. V.; ANDREOLI, C. V. Introdução. In: ANDREOLI et al. **Lodos de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2001, cap. 1, p. 13-16.

WANKE, R. et al. Avaliação da capacidade de desagramento de diferentes tipos de lodos de esgotos através de drenagem natural da água livre. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22, 2003, Joinville, SC, **Anais Eletrônicos: Abes/SC**, 2003, CD-ROM.

ANEXO A
METODOLOGIAS DE ANÁLISES

Análises de pH

Para a determinação do pH, a amostra de lodo em estado sólido foi colocada em suspensão com água destilada (10 g em 50 ml) e efetuada a leitura do pH com potenciômetro, devidamente calibrado. A temperatura foi observada e se manteve em 25° C.

Análises de sólidos totais e voláteis e fixos

Os procedimentos para a determinação de sólidos totais, fixos e voláteis em amostras de lodo estão descritos, sumariamente, a seguir.

1. Incinerar as cápsulas a serem utilizadas em forno mufla a 550° C durante 30 minutos. Esfrie com o dessecador, pese e reserve. (Peso “B”, da cápsula);
2. Pese de 25 a 50g de amostra na cápsula e seque a 103-105° C por toda a noite (Peso “C”, peso da amostra úmida);
3. Esfrie e pese (Peso “A”, do resíduo seco + cápsula);
4. Transfira a amostra para um forno mufla frio, aqueça até 550 + /- 50° C e incinere durante uma hora;
5. Esfrie em dessecador para equilibrar a temperatura e pese (Peso “D”, peso do resíduo + cápsula após a ignição).
6. Expressão dos resultados:

$$\% \text{ de sólidos totais} = \frac{(A - B) \times 100}{C - B};$$

$$\% \text{ de sólidos totais} = \frac{(A - D) \times 100}{A - B};$$

$$\% \text{ de sólidos totais} = \frac{(D - B) \times 100}{A - B};$$

A = peso do resíduo seco + cápsula;

B = peso da cápsula;

C = peso da amostra úmida + cápsula.

D = peso do resíduo seco + cápsula após a ignição

Análises bacteriológicas – Determinação do número de coliformes termotolerantes por fermentação em tubos múltiplos

O método para determinação de coliformes termotolerantes em amostras de lodo foi o dos tubos múltiplos seguindo os procedimentos do teste direto com a realização do ensaio com *caldo A-1 Medium*. Os procedimentos estão descritos a seguir:

1. Ordenar os tubos de ensaio contendo meio de cultura (*caldo A-1 Medium*) em três séries de cinco tubos cada, identificando-os.
2. Pesar 10 gramas da amostra e dissolve-la em um frasco de polietileno esterilizado (capacidade para 125 mL) com 90mL de água tamponada, obtendo uma amostra líquida;
3. Para obter a diluição 10^{-1} , acrescentar 10mL da amostra líquida em 90mL de água tamponada e homogeneizar. Proceder dessa forma na seqüência de diluição desejada. Para as amostras sem cal, partiu-se da diluição 10^{-3} mL e para as com cal da diluição 10mL.
4. Agitar o frasco com a última diluição e inocular 1mL da diluição em cada um dos tubos da primeira série de *caldo A-1 Medium*;
5. Transferir 10mL da última diluição para um tubo de ensaio contendo 90mL de água tamponada, homogeneizar e em seguida transferir 1mL para os tubos da segunda série de *caldo A-1 Medium*;
6. Transfira 10mL da diluição preparada do item anterior para 90mL de água tamponada, homogeneizar e em seguida transferir 1mL para os tubos da terceira série de *caldo A-1 medium*;
7. Incubar por 3 horas a $35 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e em seguida transferir os tubos para o banho maria a $44,5 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ por $21 \pm 2\text{h}$.
8. Proceder à leitura considerando resultados positivos para os tubos que apresentarem presença de gás no tubo de Duhran;
9. Expressão dos resultados: A densidade de coliformes é expressa como NMP/100mL. As várias combinações de resultados positivos e negativos quando são inoculados 5 porções de 10mL, 5 de 1mL e 5 de 0,1mL da amostra constam em tabela que relaciona o NMP de coliformes em 100mL. Quando se utiliza outras diluições o NMP/100mL pode ser dado pela fórmula:

$$\text{NMP/100mL} = \text{valor do NMP (da tabela)} \times \frac{10}{\text{Maior volume inoculado na série de diluição para compor o código}}$$

Caso a combinação encontrada não esteja na tabela proceder ao cálculo do NMP:

$$NMP = \frac{n^{\circ} \text{ de tubos positivos} \times 100}{\sqrt{\text{mL amostra neg} \times \text{mL de todos os tubos}}}; \quad \text{mL de todos os tubos} = 55,5$$

Para expressar os resultados NMP/100g (massa seca):

$$NMP/100g (m.s.) = \frac{\text{Valor do NMP/100 mL}}{g (massa seca) \text{ em } 100 \text{ mL}}$$

Análises parasitológicas – Determinação do número e da viabilidade dos ovos de helmintos

Em síntese, os procedimentos de análise estão descritos a seguir:

1. A amostra é pesada (50g) e diluída em 450 mL de solução tampão fosfato (0,15 Tween 80);
2. A diluição é filtrada, passando por um peneira, num becker de 2L, lavando com água até completar o volume de 2L e deixando sedimentar de um dia para o outro;
3. O sobrenadante é desprezado e o sedimento colocado em tubos para centrifugação a 2500 rpm por 3 min.;
4. O sedimento resultante é ressuspendido com solução de sulfato de zinco (d=1,18) e centrifugado a 2500 rpm por 3 min.;
5. A suspensão é transferida para um becker de 1L e completado o volume com água ($\pm 800\text{mL}$), deixando sedimentar por 24 horas;
6. O sobrenadante é desprezado e o sedimento centrifugado a 2500 rpm por 3 min., até que fique toda a amostra fique num só tubo de 15 mL;
7. A amostra é centrifugada por 3 min. a 2500 rpm e desprezado o sobrenadante;
8. O sedimento é ressuspendido em 7 mL de solução de álcool – ácido – água e 3 mL de éter, agitando o tubo por inversão, abrindo a cada inversão para escapar o vapor;
9. A amostra é centrifugada a 2500 rpm por 3 min., o sobrenadante ressuspendido em 2,5 mL de H_2SO_4 0,1 N, colocando em tubo com tampa;
10. A amostra é incubada a 26° C por 21 a 28 dias;
11. O concentrado é examinado microscopicamente na câmara de Sedgwick – Rafter.

APÊNDICE A
RESUMO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Tabela 1 – Resultados da análise de variância para o experimento 1 – Cal hidratada

Atributo	Fator de variação	GL	SQ	QM	F	Pr>F
pH	Tempo	4	46,16	11,54	420,34	0,0001
	Dose	3	231,14	77,04	3.000,15	0,0001
	CV = 1,81%					
Umidade	Tempo	6	1.182,99	197,16	16,70	0,0001
	Dose	3	174,51	58,17	3,69	0,062
	CV = 8,45%					
SV/ST	Tempo	6	423,95	70,65	4,54	0,0010
	Dose	3	465,88	155,29	14,10	0,0015
	CV = 11,56%					
Ovos viáveis de helmintos	Tempo	5	11,41	2,28	27,05	0,0001
	Dose	3	30,19	10,06	171,12	0,0001
	CV = 19,35%					
Coliformes termotolerantes	Tempo	6	26,40	4,40	13,00	0,0001
	Dose	3	302,45	100,81	158,15	0,0001
	CV = 38,65%					

GL-grau de liberdade; SQ-soma dos quadrados; QM-quadrado médio; CV-coeficiente de variação.

Tabela 2 – Resultados da análise de variância para o experimento 2 – Cal virgem

Atributo	Fator de variação	GL	SQ	QM	F	Pr>F
pH	Tempo	5	19,93	3,98	70,15	0,0001
	Dose	3	347,91	115,97	3.023,15	0,0001
	CV = 2,31%					
Umidade	Tempo	6	2.600,06	433,34	50,26	0,0001
	Dose	3	1.869,72	623,24	71,95	0,0001
	CV = 8,56%					
SV/ST	Tempo	6	59,73	9,95	3,78	0,0037
	Dose	3	1.037,39	345,79	102,80	0,0001
	CV = 4,78%					
Ovos viáveis de helmintos	Tempo	5	5,76	1,15	11,16	0,0001
	Dose	3	15,10	5,03	281,75	0,0001
	CV = 24,70%					
Coliformes termotolerantes	Tempo	6	40,48	6,74	27,88	0,0001
	Dose	3	347,64	115,88	1.406,91	0,0001
	CV = 47,48%					

GL-grau de liberdade; SQ-soma dos quadrados; QM- quadrado médio; CV-coeficiente de variação.

Tabela 3 – Resultados da análise de variância conjunta dos experimentos 1 e 2

Atributo	Fator de variação	GL	SQ	QM	F	Pr>F
pH	Cal	1	50,09	50,09	1.564,36	0,0001
	CV = 2,14%					
Umidade	Cal	1	1.698,52	1.692,52	139,13	0,0001
	CV = 8,53%					
SV/ST	Cal	1	2,99	2,99	0,42	0,5282
	CV = 8,90%					
Ovos viáveis de helmintos	Cal	1	1,01	1,01	26,34	0,0001
	CV = 21,07%					
Coliformes termotolerantes	Cal	1	7,08	7,08	19,66	0,0004
	CV = 42,50%					

GL-grau de liberdade; SQ-soma dos quadrados; QM-quadrado médio; CV-coeficiente de variação