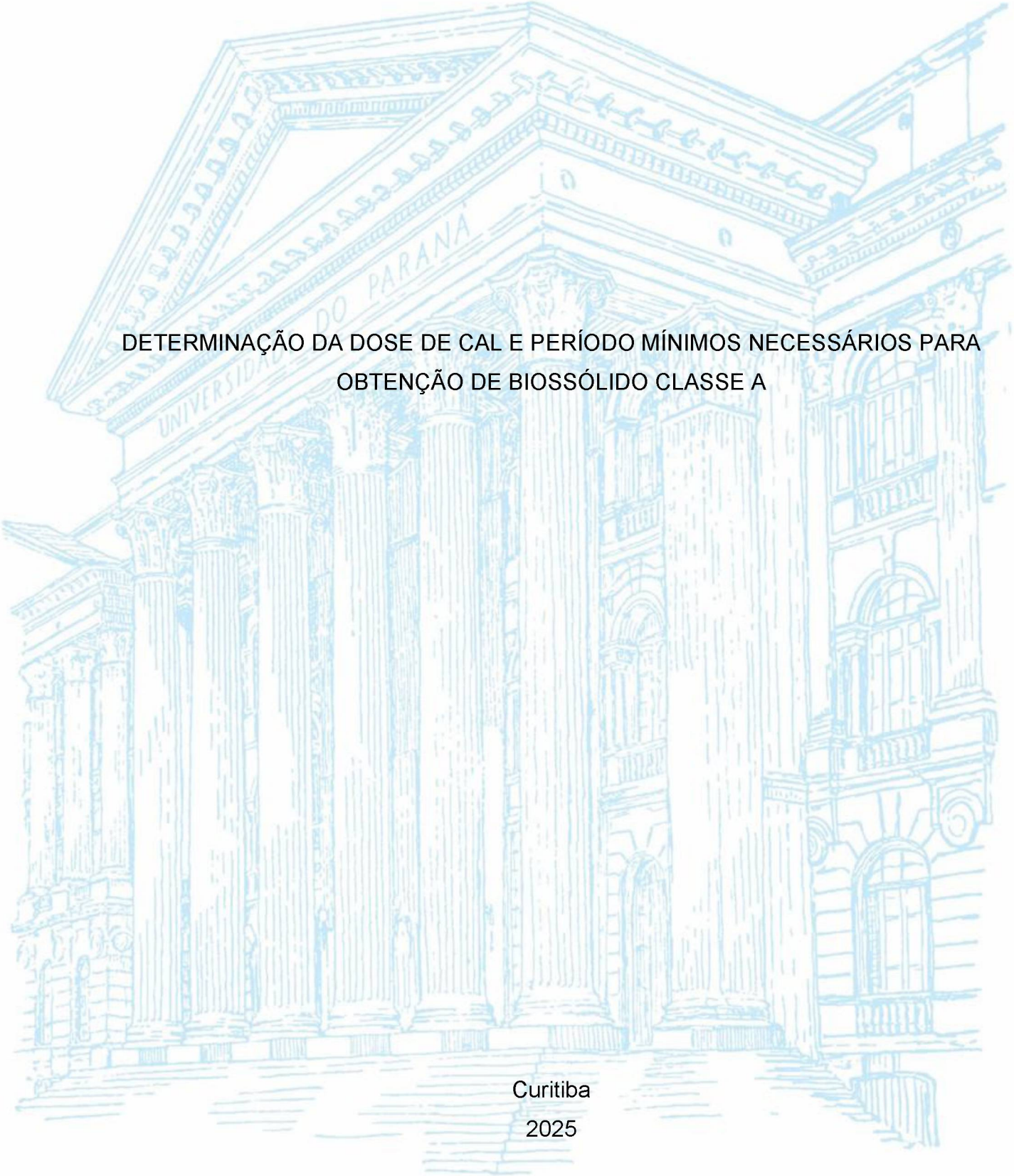
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GUILHERME ALVES DOS SANTOS



DETERMINAÇÃO DA DOSE DE CAL E PERÍODO MÍNIMOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DE BIOSSÓLIDO CLASSE A

Curitiba

2025

GUILHERME ALVES DOS SANTOS

DETERMINAÇÃO DA DOSE DE CAL E PERÍODO MÍNIMOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DE BIOSSÓLIDO CLASSE A

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Miguel Mansur Aisse
Coorientadora: Dr. Simone Bittencourt

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Santos, Guilherme Alves dos
Determinação da dose de cal e período mínimos necessários para obtenção de biossólido classe A / Guilherme Alves dos Santos. – Curitiba, 2025.
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Miguel Mansur Aisse
Coorientador: Simone Bittencourt

1. Lodo - Higienização. 2. Cal. 3. Cal virgem. 4. Cal hidratada. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. III. Aisse, Miguel Mansur. IV. Bittencourt, Simone. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **GUILHERME ALVES DOS SANTOS**, intitulada: **Determinação da dose de cal e período mínimos necessários para obtenção de biossólido classe A**, sob orientação do Prof. Dr. MIGUEL MANSUR AISSE, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 16 de Junho de 2025.

Assinatura Eletrônica
17/06/2025 16:18:56.0
MIGUEL MANSUR AISSE
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
17/06/2025 10:07:25.0
MARIA ELISA MAGRI
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica
17/06/2025 11:48:47.0
CHARLES CARNEIRO
Avaliador Externo (SANEPAR)

Assinatura Eletrônica
17/06/2025 08:28:44.0
SIMONE BITTENCOURT
Coorientador(a)

Assinatura Eletrônica
16/06/2025 19:06:21.0
HELOISE GARCIA KNAPIK
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.
Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 459962
Para autenticar este documento/assinatura, acesse https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp e insira o codigo 459962

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha mãe e avó, Maria de Fátima Alves dos Santos, por todos os anos de dedicação, apoio incondicional e financiamento dos meus estudos. Sem sua força e cuidado, esta conquista não teria sido possível.

Agradeço também aos professores, membros de banca e coorientadores, Dra. Simone Bittencourt, Dra. Karen Amaral, Dra. Heloise Knapik, Dra. Maria Elisa e Dr. Charles Carneiro, registro minha sincera gratidão pelas contribuições e orientações que enriqueceram esta pesquisa.

Agradeço ao laboratório da Sanepar, nas pessoas de Patrícia e Audrei, bem como ao gestor da ETE Santa Quitéria, Jorge Hilário, ao agente técnico Leandro Ciotta e a todos os colaboradores da estação, pelo apoio e colaboração durante as etapas do trabalho.

De maneira muito especial, agradeço a três pessoas que marcaram profundamente minha trajetória acadêmica. À minha amiga Leslie Chumbe Chavely, pela parceria no laboratório e pelo auxílio em todas as etapas experimentais do trabalho. Ao meu orientador, Dr. Miguel Mansur Aisse, exemplo de sabedoria, liderança, retidão e humanidade, além de ser uma das pessoas mais divertidas que conheço. E ao professor, amigo e colega de pós-graduação, Marcos André Capitulino de Barros Filho, que me auxiliou durante toda a pesquisa e me incentivou a seguir o caminho do mestrado e a expandir meus horizontes pelo Brasil.

Estendo também meus agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento da bolsa de estudos, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, pelo ambiente acadêmico e de trabalho que possibilitou a execução desta pesquisa.

Por fim, agradeço ao meu amor, Amanda Bianca Aguiar, pelo apoio inestimável e pela presença fundamental nos momentos mais desafiadores e decisivos da finalização desta dissertação.

RESUMO

A estabilização alcalina é uma técnica promissora para o tratamento de lodo de esgoto, visando a redução de patógenos e a produção de biossólido seguro para destinação final com uso agrícola. Este trabalho investigou a eficácia da adição de cal virgem (CaO) e cal hidratada ($Ca(OH)_2$) na higienização de lodo anaeróbio desaguado por centrífuga, provenientes de reatores UASB. O estudo foi dividido em duas etapas principais: avaliação físico-química e avaliação microbiológica. Na avaliação físico-química, testaram-se proporções de 30%, 40% e 50% de cal (em relação aos sólidos totais do lodo) e um controle (0%), monitorando pH, sólidos totais (ST) e temperatura por 30 dias. Verificou-se que a dose de 30% de ambas as cales foi suficiente para elevar e manter o pH acima de 12 por 30 dias, atendendo ao critério da CONAMA 498/2020 (pH>12 por 72h) e Instrução Normativa n° 38 do estado do Paraná para estabilização alcalina prolongada. A cal virgem induziu aumento significativo de temperatura nas primeiras horas (até 41,27°C com 50% de cal), potencializando a higienização, enquanto a cal hidratada não apresentou efeito térmico; nenhuma das condições atingiu o critério de temperatura (> 50°C por 12h) da CONAMA 498/2020 para higienização térmica associada. Na avaliação microbiológica, utilizou-se a dose de 30% de ambas as cales, monitorando coliformes termotolerantes, Salmonella spp. (inoculada), ovos viáveis de helmintos e colifagos somáticos ΦX-174 (inoculado) por 30 dias. Ambos os tratamentos com cal foram altamente eficazes na redução rápida dos indicadores bacterianos: coliformes termotolerantes atingiram níveis abaixo do limite de detecção a partir do terceiro dia, e Salmonella spp. foi inativada nas primeiras horas, atendendo aos critérios da CONAMA 498/2020 e padrões internacionais. Contudo, a inativação do colifago somático foi mais lenta, alcançando níveis indetectáveis somente após segunda semana, evidenciando a maior resistência viral ao tratamento alcalino. Os ovos viáveis de helmintos não foram encontrados em números quantificáveis no lodo inicial, impossibilitando a avaliação de sua inativação. Conclui-se que a dose de 30% é recomendada como referência inicial, sendo suficiente para a manutenção da alcalinidade necessária e a redução efetiva de microrganismos bacterianos e virais, e que o período mínimo necessário de cura é de 21 dias, haja vista a necessidade de um período maior em relação aos bioindicadores virais. A diferença na cinética de inativação dos patógenos reforça a importância de monitorar indicadores virais para garantir a segurança sanitária completa do biossólido. Sugere-se a realização de experimentos em escala plena, a avaliação de processos combinados (alcalino + térmico) e a inoculação de ovos de helmintos para estudos futuros.

Palavras-chave: higienização de lodo; lodo anaeróbio; redução de patógenos; cal virgem e; cal hidratada.

ABSTRACT

Alkaline stabilization is a promising technique for sewage sludge treatment, aiming at pathogen reduction and the production of safe biosolids for final disposal with agricultural use. This work investigated the effectiveness of adding quicklime (CaO) and hydrated lime ($Ca(OH)_2$) in the hygienization of centrifuge-dewatered anaerobic sludge from UASB reactors. The study was divided into two main stages: physicochemical evaluation and microbiological evaluation. In the physicochemical evaluation, proportions of 30%, 40%, and 50% lime (relative to the total solids of the sludge) and a control (0%) were tested, monitoring pH, total solids (TS), and temperature for 30 days. It was verified that the 30% dose of both limes was sufficient to raise and maintain pH above 12 for 30 days, meeting the criteria of CONAMA Resolution 498/2020 (pH > 12 for 72h) and Normative Instruction No. 38 of the State of Paraná for prolonged alkaline stabilization. Quicklime induced a significant increase in temperature in the first hours (up to 41.27°C with 50% lime), enhancing hygienization, while hydrated lime showed no thermal effect; none of the conditions met the temperature criterion (> 50°C for 12h) of CONAMA 498/2020 for associated thermal hygienization. In the microbiological evaluation, a 30% dose of both limes was used, monitoring thermotolerant coliforms, Salmonella spp. (inoculated), viable helminth eggs, and somatic coliphages ΦX-174 (inoculated) for 30 days. Both lime treatments were highly effective in the rapid reduction of bacterial indicators: thermotolerant coliforms reached levels below the detection limit from the third day, and Salmonella spp. was inactivated within the first hours, meeting CONAMA 498/2020 criteria and international standards. However, the inactivation of somatic coliphage was slower, reaching undetectable levels only after the second week, highlighting the greater viral resistance to alkaline treatment. Viable helminth eggs were not found in quantifiable numbers in the initial sludge, preventing the evaluation of their inactivation. It is concluded that the 30% dose is recommended as an initial reference, being sufficient to maintain the required alkalinity and effectively reduce bacterial and viral microorganisms, and that the minimum curing period required is 21 days, given the need for a longer period with respect to viral bioindicators. The difference in pathogen inactivation kinetics reinforces the importance of monitoring viral indicators to ensure complete sanitary safety of the biosolid. It is suggested that full-scale experiments, evaluation of combined processes (alkaline + thermal), and inoculation of helminth eggs be carried out in future studies.

Keywords: Sludge sanitization; anaerobic sludge; pathogen reduction; quicklime; hydrated lime.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO METABOLISMO DE BACTÉRIAS HETEROTRÓFICAS 24
FIGURA 2 - REGIME TEMPO-TEMPERATURA PARA ENQUADRAMENTO DO BIOSSÓLIDO CLASSE A CONFORME PRECONIZADO PELA RESOLUÇÃO CONAMA Nº 498/2020 47
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA PILOTO DE LEITO MODIFICADO DE SECAGEM E HIGIENIZAÇÃO TÉRMICA DE FORMA SIMULTÂNEA: A) VISTA FRONTAL E B) VISTA LATERAL 48
FIGURA 4 – LODO EM COMBUSTÃO SOB PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA 54
FIGURA 5 - ESTRUTURAS NECESSÁRIAS PARA O PROCESSO DE EAP 58
FIGURA 6 - CORTE ESQUEMÁTICO DE MONTE DE LODO DISPOSTO NO PÁTIO PARA PROCESSO DE EAP 59
FIGURA 7 - VISTA AÉREA DA ETE SANTA QUITÉRIA 62
FIGURA 8 - FLUXOGRAMA NA ETE SANTA QUITÉRIA 63
FIGURA 9 – PRECIPITAÇÃO REGISTRADA DURANTE AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA 64
FIGURA 10 - PRECIPITAÇÃO REGISTRADA DURANTE AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA 65
FIGURA 11 – CALES UTILIZADAS PARA O EXPERIMENTO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA E O PÁTIO COBERTO 66
FIGURA 12 – UNIDADE DE DESAGUAMENTO DA ETE SANTA QUITÉRIA 68
FIGURA 13 - UNIDADES EXPERIMENTAIS DA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA 70
FIGURA 14 - BETONEIRA E BALANÇA UTILIZADAS PARA REALIZAR A MISTURA E PESAGEM DO LODO-CAL 73
FIGURA 15 - ARRANJO DAS AMOSTRAS DO LODO NO PÁTIOS PARA AS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS 73
FIGURA 16 – DISPOSIÇÃO DAS UNIDADES EXPERIMENTAIS NA FASE 1 PARA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E INSERÇÃO DOS TERMOPARES NAS PILHAS DE LODO NAS UNIDADES 75
FIGURA 17 - DISPOSIÇÃO DAS UNIDADES EXPERIMENTAIS REFERENTES À FASE 2 PARA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA 75

FIGURA 18 – ACONDICIONAMENTO E IDENTIFICAÇÕES DAS AMOSTRAS PARA REALIZAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSCO-QUÍMICAS 76
FIGURA 19 – ACONDICIONAMENTO, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS UTILIZADOS PARA ANÁLISES DA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA 79
FIGURA 20 – LOTE DE LODO, BALANÇA E BETONEIRA UTILIZADAS PARA REALIZAÇÃO DA AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA 82
FIGURA 21 – DISPOSIÇÃO DAS UNIDADES EXPERIMENTAIS PARA AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA 87
FIGURA 22 – COLETORES DE PLÁSTICOS UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA 88
FIGURA 23 – FRASCOS E TUBOS CONTENDO AMOSTRA DE LODO PARA REALIZAÇÃO DO MÉTODO DE OBTENÇÃO DE COLIFORMES TERMOTOLERANTES 92
FIGURA 24 - VALORES DE pH DO LODO ANAERÓBIO SOB ESTABILIZAÇÃO ALCALINA 97
FIGURA 25 - VALORES DE SÓLIDOS TOTAIS DO LODO ANAERÓBIO SOB ESTABILIZAÇÃO ALCALINA 99
FIGURA 26 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO LODO DE ESGOTO ANAERÓBIO SOB PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA 101
FIGURA 27 - VALORES DE TEMPERATURA DO LODO ANAERÓBIO SOB ESTABILIZAÇÃO ALCALINA 103
FIGURA 28 - REDUÇÃO DOS COLIFORMES TERMOTOLERANTES NO LODO DE ESGOTO SOB PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA 106
FIGURA 29 – PRESENÇA DE *SALMONELLA* SPP. AO LONGO DO PERÍODO EXPERIMENTAL 109
FIGURA 30 - DECAIMENTO DOS COLIFAGO SOMÁTICO DECAIMENTO NO LODO DE ESGOTO SOB PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA 112

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – LIMITE DE PATÓGENOS PARA OBTENÇÃO DE BIOSSÓLIDO "CLASSE A" DE ACORDO COM AS LEGISLAÇÕES DE CADA PAÍS 35
QUADRO 2 – AGENTES PATOGÊNICOS PRESENTES NO LODO DE ESGOTO, SUAS DOENÇAS E SINTOMAS CORRELATOS 35
QUADRO 3 - PROCESSOS PARA OBTENÇÃO DE BIOSSÓLIDOS CLASSE A E CLASSE B CONFORME PRECONIZADO PELA RESOLUÇÃO CONAMA N° 498/2020 53
QUADRO 4 - FREQUENCIA DE MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS ANALISADOS PARA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA 77
QUADRO 5 – MÉTODOS, EQUIPAMENTOS E FREQUENCIA DE MONITORAMENTO PARA O EXPERIMENTO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA PARA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA 78
QUADRO 6 – PARÂMETROS MICROBIOLÓGICOS ANALISADOS E RESPECTIVOS LABORATÓRIOS DE ANÁLISE CONFORME OS DIAS DE AMOSTRAGEM 89
QUADRO 7 – FREQUENCIA DE MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS ANALISADOS PARA AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA 90
QUADRO 8 – MÉTODOS UTILIZADOS NO EXPERIMENTO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA PARA AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA 90
QUADRO 9 - METODOLOGIA DE TRABALHOS COM ESTABIIZAÇÃO ALCALINA DE LODO DE ESGOTO 95

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TEOR DE SÓLIDOS DO LODO DE DIVERSOS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO 27
TABELA 2 - CONCENTRAÇÃO DE COLIFORMES TERMOTOLERANTES E *SALMONELLAS* 39
TABELA 3 - CONCENTRAÇÃO DE OVOS DE HELMINTOS EM LODO 42
TABELA 4 - PARÂMETROS EM LOTES DE LODO SOB EFEITOS DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA 56
TABELA 5 - REGISTRO DE TEMPERATURA DO AR DURANTE AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA 64
TABELA 6 - REGISTRO DE TEMPERATURA DO AR DURANTE AVALIAÇÃO MICROBIOLOGICA 65
TABELA 7 - CARACTERÍSTICAS DO LODO UTILIZADO NO EXPERIMENTO PARA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA 69
TABELA 8 – CONFIGURAÇÃO DAS UNIDADES EXPERIMENTAIS E PROPORÇÕES DE CAL UTILIZADAS NO EXPERIMENTO PARA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA 70
TABELA 9 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS CALES UTILIZADAS NO EXPERIMENTO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA PARA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA 71
TABELA 10 - MASSA DE CAL UTILIZADA PARA CADA PROPORÇÃO NO EXPERIMENTO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA PARA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA 72
TABELA 11 - NÚMEROS DE AMOSTRAS UTILIZADAS PARA REALIZAÇÃO DAS DUAS FASES DO EXPERIMENTO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA PARA AVALIAÇÃO DE pH E ST 80
TABELA 12 - CARACTERÍSTICAS DO LODO UTILIZADO NO EXPERIMENTO PARA AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA 82
TABELA 13 - MASSA DE CAL UTILIZADA PARA CADA PROPORÇÃOO NO EXPERIMENTO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA PARA AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA 85
TABELA 14 - VALORES DE pH DURANTE A AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA 105

TABELA 15 - CONCENTRAÇÃO DE SALMONELLA SPP. NO EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA 111
TABELA 16 - COLIFAGOS SOMATICOS ENCONTRADOS NO EXPERIMENTO DA AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA 113

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$Al_2(SO_4)_3$ - Sulfato de alumínio
C - Carbono
$Ca(OH)_2$ - Hidróxido de cálcio ou cal hidratada
$CaCO_3$ - Carbonato de cálcio
CaO - Óxido de cálcio ou cal virgem
Ca^{2+} - Cátions de cálcio
CH_4 - Metano
CO_2 - Dióxido de Carbono
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
EA - Estabilização alcalina
EAP - Estabilização alcalina prolongada
ETE - Estação de Tratamento de Esgoto
ETE's - Estações de Tratamento de Esgoto
$FeCl_3$ - Cloreto férrico
g - Grama
HCl - Ácido clorídrico
HAV - Vírus da hepatite A
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
K - Potássio
LABEAM - Laboratório de Engenharia Ambiental Francisco Borsari Netto
L - Litro
LDM - Limite de detecção do método
LIA - *Lysine Iron Agar*
mL - Mililitro
MgO - Óxido de magnésio
MLC - Mistura lodo-cal
MO - Matéria orgânica
MSRV - *Modified Rappaport-Vassiliadis*
NH_3 - Amônia livre
NH^{4+} - Íon amônico
N - Nitrogênio
NMP - Número Mais Provável

NO_3^-	- Nitrato
O_2	- Oxigênio molecular
P	- Fósforo
pH	- Potencial hidrogeniônico
PNRS	- Política Nacional de Resíduos Sólidos
RMC	- Região Metropolitana de Curitiba
RReSSa	- Recuperação de Recursos em Sistemas de Saneamento
RV	- Rappaport-Vassiliadis
SANEPAR	- Companhia de Saneamento do Paraná
S	- Enxofre
SDT	- Sólidos dissolvidos totais
SEMA	- Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SF	- Sólidos fixos
SFT	- Sólidos fixos totais
SNIS	- Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SO_4^{2-}	- Sulfato
SST	- Sólidos suspensos totais
ST	- Sólidos Totais
STHIL	- Sistema Térmico de Higienização do Lodo
SV	- Sólidos voláteis
SVT	- Sólidos voláteis totais
T	- Temperatura
TSI	- *Triple Sugar Iron*
TYGB	- *Tryptone-Yeast extract-Glucose Both*
UASB	- *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*
UFP	- Unidade Formadora de Placas
UGL	- Unidade de Gerenciamento de Lodo
USEPA	- *United States Environmental Protection Agency*
UV	- Ultravioleta
XLD	- *Xylose Lysine Deoxycholatei*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18
1.1 OBJETIVOS 21
1.1.1 Objetivo geral 21
1.1.2 Objetivos específicos 21
2 REVISÃO DE LITERATURA 22
2.1 LODO DE ESGOTO SANITÁRIO 22
2.1.1 Geração e produção de lodos de esgoto 24
2.1.2 Composição e tratamento do lodo de esgoto 26
2.1.3 Formas de tratamento do lodo de esgoto 28
2.1.3.1 Adensamento 28
2.1.3.2 Estabilização 29
2.1.3.3 Condicionamento 30
2.1.3.4 Desaguamento 31
2.1.3.5 Higienização 32
2.2 PATÓGENOS DE LODO DE ESGOTO 33
2.2.1 Patógenos bacterianos 36
2.2.2 Vírus entéricos 40
2.2.3 Helmintos 41
2.3 HIGIENIZAÇÃO DO LODO 44
2.3.1 Processos de higienização 45
2.3.1.1 Higienização via térmica 45
2.3.1.1.1 Secagem térmica 47
2.3.1.1.2 Pirólise e gaseificação 49
2.3.1.2 Higienização via química 49
2.4 ESTABILIZAÇÃO ALCALINA 50
2.4.1 Estabilização Alcalina Prolongada 56
3 METODOLOGIA 61
3.1 ÁREA DE ESTUDO E CLIMA 61
3.1.1 Descrição da área de realização do experimento 61
3.1.2 Condições climatológicas do período de experimento 63
3.2 AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO EXPERIMENTO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA 66

3.2.1 Lodo utilizado no experimento para avaliação físico-química 67
3.2.2 Definição da massa de lodo e das concentrações de cales nas unidades experimentais para avaliação físico-química 69
3.2.3 Procedimentos iniciais e instalação experimental para avaliação físico-química 72
3.2.4 Método da amostragem para avaliação físico-química 76
3.2.5 Frequência das coletas e parâmetros analisados para avaliação físico-química 77
3.3 AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA DO EXPERIMENTO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA 80
3.3.1 Lodo utilizado no experimento para avaliação microbiológica 81
3.3.2 Inoculação de salmonela e bacteriófagos no lodo utilizado no experimento 83
3.3.3 Definição da massa de lodo e massas e concentrações de cal nas unidades experimentais para avaliação microbiológica 84
3.3.4 Procedimentos iniciais e instalação experimental para avaliação microbiológica 86
3.3.5 Método de amostragem para avaliação microbiológica 87
3.3.6 Frequência das coletas e parâmetros analisados para avaliação microbiológica 89
3.3.6.1 Processo para obtenção de coliformes termotolerantes 90
3.3.6.2 Processo para obtenção de Salmonella 92
3.3.6.3 Processo para obtenção de bacteriófagos 93
3.3.6.4 Demais processos utilizados para caracterização inicial e final do lodo sob tratamento de estabilização alcalina para avaliação microbiológica 93
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 96
4.1 AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LODO SOB PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA 96
4.1.1 Potencial hidrogeniônico (pH) 96
4.1.2 Sólidos totais (ST) 98
4.1.3 Temperatura (T) 101
4.2 AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA DO LODO SOB PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA 104
4.2.1 Coliformes termotolerantes 105
4.2.2 Salmonela spp 108

4.2.3 Bacteriófagos 111
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 115
5.1 CONCLUSÃO 115
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 116
REFERÊNCIAS 117
APÊNDICE 1 – TABELAS DOS VALORES DE PH 127
APÊNDICE 2 – TABELAS DOS VALORES DE SÓLIDOS TOTAIS 131
APÊNDICE 3 – TABELAS DOS VALORES DE TEMPERATURA 135
APÊNDICE 4 – TABELAS DOS VALORES DE COLIFORMES TERMOTOLERANTES 151

1 INTRODUÇÃO

O tratamento de águas residuárias gera lodo como subproduto, cujas características variam de acordo com o efluente de origem e os processos de tratamento utilizados. O correto manejo e destinação desse lodo são essenciais para evitar impactos ambientais negativos e riscos à saúde pública. Segundo a Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o lodo de esgoto é um subproduto gerado durante o tratamento do esgoto sanitário, por processos de decantação primária, biológico ou químico, não incluindo resíduos sólidos removidos de desarenadores, de gradeamento e peneiramento (Brasil, 2020). No Brasil a lei federal n° 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), classifica os resíduos gerados nas atividades de serviço público de saneamento básico, por consequente o lodo das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE's), como resíduo sólido, mesmo com o lodo de esgoto não apresentando um estado totalmente sólido em alguns casos (Brasil, 2010).

A PNRS estabelece uma ordem de prioridade na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, que inclui não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e, somente por último, a disposição em aterro. O gerenciamento do lodo nas estações, até sua destinação final é responsáveis por mais de 50% dos custos operacionais totais, principalmente no cenário atual onde a estimativa de produção de lodo é crescente dado o avanço tecnológico dos tratamentos de efluentes sanitários e crescimento populacional (Cerqueira; Aisse, 2021).

Como exemplo, são produzidos anualmente mais de 11 milhões de toneladas de lodo seco na União Europeia; mais de 12 milhões de toneladas de lodo seco nos Estados Unidos; mais de 60 milhões de toneladas na China de lodo de esgoto (20% de ST); e uma estimativa de produção global de lodo seco para mais de 100 milhões de toneladas, com previsão de aumento para mais de 150 milhões de toneladas para 2025 (Seiple; Coleman; Skaggs, 2017; Collivignarelli *et al.*, 2019; Vaithyanathan; Cabana, 2021). No Brasil, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), foram gerados cerca de 5 bilhões de m³ de esgoto em 2022 e conta com uma produção de 1.454 toneladas de lodo por dia (Lopes *et al.*, 2020; Brasil, 2022).

Com o avanço dos sistemas de saneamento, a evolução das tecnologias de tratamento de esgoto, crescimento populacional e aumento resultante na produção de

lodo de esgoto, as estações de tratamento de esgoto se deparam com o desafio significativo de administrar um volume substancial de lodo gerado até uma destinação final ambientalmente adequada. Tradicionalmente, a destinação do lodo tem ocorrido por meio de aterramento, incineração ou uso agrícola. No entanto, enquanto a disposição em aterros e a incineração são alternativas onerosas e associadas a significativas emissões atmosféricas, a aplicação do lodo na agricultura se destaca como uma opção mais sustentável. Esse uso possibilita a reciclagem de micro e macronutrientes, conferindo ao lodo um valor agronômico relevante, seja como fertilizante, seja como corretivo do solo (Collivignarelli *et al.*, 2019; Nylen; Sheehan, 2023).

Pensando em uma destinação final sustentável para o lodo e alinhada à PNRS, o aproveitamento agrícola surge como uma boa alternativa, visto que o lodo é um subproduto rico em matéria orgânica e nutrientes como nitrogênio (N), potássio (K), fósforo (P), enxofre (S) e carbono (C), devolvendo os nutrientes e trazendo benefícios físico-químicos e biológicos ao solo, consequentemente, contribuindo para a saúde pública, para a preservação ambiental e para o desenvolvimento socioeconômico, fortalecendo a economia circular (Bittencourt *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2023).

Para tanto, a destinação do lodo de esgoto para fins agrícolas exige um nível de tratamento que garanta sua segurança sanitária. O lodo deve passar por processo de desaguamento para redução de volume, e por processo de redução da presença de patógenos, tornando-o adequado para manuseio e uso agrícola. Conforme Silva *et al.* (2007), o lodo proveniente do tratamento de esgoto reflete as condições sanitárias da população atendida pela rede de esgotamento, por isso a preocupação com a sanidade do lodo. Dessa forma, a presença e as concentrações de microrganismos patogênicos são influenciadas pela saúde da população, além de fatores como características regionais, sazonalidade e o tipo de tratamento de esgoto adotado.

A eficiência do processo de redução de patógenos é avaliada através da redução de bioindicadores como: coliformes fecais, salmonela e ovos viáveis de helmintos (Popova *et al.*, 2014; Lopes *et al.*, 2020; Chaudhary; Gough, 2021; el Hayany *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2023; Mora; Mejía, 2024). O uso de bioindicadores é essencial, pois permite verificar se o biossólido atende aos padrões sanitários exigidos pelas legislações, haja visto que a diversidade de microrganismos presentes no lodo torna inviável o rastreamento de todos eles (Sidhu; Toze, 2009; Yang *et al.*, 2023).

As regulamentações nacionais, como as do Brasil (Brasil, 2020) dos Estados Unidos da América (Usepa, 1994) e União Europeia (Eec, 1986), estabelecem critérios rigorosos para a conversão de lodo de esgoto em biossólidos, que podem ser utilizados em aplicações de recuperação de solos degradados ou como fertilizantes na agricultura, sendo classificados principalmente em duas categorias: Classe A e Classe B, de acordo com os níveis de tratamento e restrições de uso. Além de definir os limites para parâmetros como patógenos, metais pesados e contaminantes, essas regulamentações também indicam tecnologias de tratamento compatíveis. Entre as principais destacam-se os que utilizam processos térmicos, biológicos e químicos, como a Estabilização Alcalina (EA) com adição de cal, que eleva o potencial hidrogeniônico (pH) e promove a eliminação de microrganismos patogênicos.

A nível nacional, a Resolução CONAMA n° 498/2020 estabelece critérios e procedimentos para a produção de biossólidos por métodos de EA, Alternativa 2 (Lodo tratado por processos que proporcionem valores elevados de pH e temperatura), na qual o processo é realizado em 72 horas. Já, no estado do Paraná, se utiliza o método denominado Estabilização Alcalina Prolongada (EAP) a mais de 20 anos, que transforma o lodo de esgoto em biossólido (Andersson *et al.*, 2016). O processo de EAP consiste em promover a elevação do pH em no mínimo 12, mediante a adição de cal ao lodo em quantidades de 30% a 50% dos sólidos totais e posterior período de cura de 30 dias, período de tempo bastante superior ao do processo EA (Bittencourt; Aisse; Serrat, 2017). Por suas características, o processo é demorado e exige disponibilidade de significativa área de pátios para armazenamento do material. O processo é aceito pelo órgão ambiental atendendo a Alternativa 5 (Lodo tratado em um processo equivalente a um processo de redução adicional de patógenos) da Instrução Normativa n° 38 do Instituto Água e Terra – IAT (IAT, 2025).

Em estudos de estabilização alcalina para elevação de pH de lodo de esgoto Souza *et al.* (2018) e Pegorini *et al.* (2006a) observaram que lodos mais úmidos (provenientes de desaguamento mecânico) exigiram maiores quantidades de cal para obtenção de pH acima de 12. Por outro lado, Bittencourt e Ziliotto (2017) em estudo de caso utilizando 16 lotes de lodo aeróbio e 20 lotes de lodo anaeróbio da Região Metropolitana de Curitiba (RMC) tratados por processo EAP, observaram que o pH médio dos lotes anaeróbios foi inferior ao dos lotes aeróbios.

Dessa forma, para reduzir custos na aplicação de cal ao lodo e a necessidade de pátio para armazenamento no processo de estabilização alcalina, é necessário

buscar o uso de menores doses de cal ao lodo de esgoto e verificar o tempo mínimo necessário para que o pH se mantenha no nível de 12, garantido a redução de patógenos e evitando o excesso de tempo no pátio e riscos de recontaminação. Amortização os impactos nas ETE's que gerenciam seu lodo de esgoto através de processos EA e, principalmente, EAP, dando celeridade ao processo de estabilização alcalina dentro do que cita a legislação brasileira e legislação estadual do Paraná.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Determinar a dose mínima de cal e o período mínimo de cura necessários para obtenção de biossólido Classe A, a partir de avaliações físico-químicas e microbiológicas da estabilização alcalina de lodo de esgoto doméstico, conforme critérios apontados pela Resolução CONAMA n° 498/2020 e pelo processo de estabilização alcalina prolongada adotado no estado do Paraná.

1.1.2 Objetivos específicos

Avaliar o comportamento dos parâmetros físico-químicos (pH, sólidos totais e temperatura) durante o processo de estabilização alcalina, com cal virgem e cal hidratada, ao longo de 30 dias.

Avaliar o comportamento dos parâmetros microbiológicos (coliformes termotolerantes, salmonella spp., ovos viáveis de helmintos e bacteriófagos) e sua redução durante o processo de estabilização alcalina com as doses consideradas mais eficientes de cal virgem e cal hidratada, ao longo de 30 dias.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 LODO DE ESGOTO SANITÁRIO

O conceito de "lodo" é comumente empregado para descrever os resíduos sólidos resultantes do tratamento de esgoto, cuja composição é fortemente influenciada pela origem do esgoto tratado. As características do lodo variam de acordo com a composição do esgoto, refletindo diretamente as diferentes fontes e tipos de contaminantes presentes. Esgotos provenientes de áreas residenciais, comerciais e industriais possuem composições químicas e biológicas específicas, resultando em lodos com propriedades e características igualmente variadas. No caso dos esgotos domésticos, os lodos tendem a ser ricos em matéria orgânica biodegradável e nutrientes, enquanto os compostos de esgoto industriais podem conter metais pesados, compostos orgânicos persistentes e outras substâncias tóxicas, exigindo tratamentos específicos para sua estabilização e destinação final segura (Metcalf & Eddy, 2014).

O tratamento de esgoto é um processo essencial para a preservação dos recursos hídricos e a promoção da saúde pública. Envolve a remoção de contaminantes físicos, químicos e biológicos presentes nas águas residuárias, visando reduzir os impactos ambientais e permitir o reuso seguro da água tratada. Este processo pode ser dividido em três níveis principais: tratamento primário, secundário e terciário (Jordão; Pessôa, 2017).

a) Tratamento primário: primeiro nível de tratamento, onde são removidos os sólidos em suspensão através de processos físicos como decantação e flotação. Segundo (Jordão; Pessôa, 2017), o tratamento primário pode remover aproximadamente 50-70% dos sólidos suspensos totais (SST), produzindo lodo primário caracterizado pela presença de SST e parte da matéria orgânica advinda do esgoto;

b) Tratamento secundário: remoção da matéria orgânica dissolvida e em suspensão, utilizando processos biológicos onde microrganismos degradam a matéria orgânica. Os métodos mais comuns incluem lodos ativados, filtros biológicos, lagoas de estabilização e reatores anaeróbios de manto de lodo (UASB). Estes métodos produzem lodos biológicos que contêm microrganismos que assimilam e transformam parte da matéria

orgânica, que por sua vez passa a fazer parte da massa microbiana. De acordo com (Jordão; Pessôa, 2017), o tratamento secundário é capaz de remover até 90% da matéria orgânica, a depender da tecnologia adotada para o tratamento;

c) Tratamento terciário: destinado à remoção de poluentes específicos que não são eliminados nos tratamentos primários e secundários, como nutrientes (nitrogênio e fósforo), metais pesados, inativação de patógenos e compostos orgânicos recalcitrantes (Jordão; Pessôa, 2017).

O lodo de esgoto pode ser denominado de biossólido, porém, é necessário submetê-lo a uma série de operações unitárias como adensamento, estabilização, desaguamento, higienização e secagem. Essas etapas são fundamentais para garantir que o produto final, agora denominado biossólido, esteja em conformidade com os critérios microbiológicos e físico-químicos exigidos pelos órgãos regulamentadores, tornando-o apto a uso mais nobres como a aplicação em solos agrícolas e recuperações de áreas degradadas. De acordo com a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), biossólidos são produto sólidos essencialmente orgânicos, gerados por processos de tratamento de esgotos, e que podem ser reciclados de forma benéfica (Brasil, 2020; Usepa, 2023).

Mundialmente, são várias as experiências de utilização do biossólido em diversas culturas com a função de adubação (Marouani *et al.*, 2021; Saliu *et al.*, 2024). No Brasil, a aplicação do lodo de biossólido em áreas agrícolas outrora limitada aos estados de São Paulo, Paraná, Rio grande do Sul, Espírito Santo e Distrito Federal, agora conta, também, com aplicação de biossólido nos Estados do Rio de Janeiro, Goiás, além de projetos pilotos em Mato Grosso e Minas Gerais. Vale ressaltar que existe uma complexidade logística associada ao processo de aplicação de biossólido, restrições legais, necessidade de profissionais qualificados e indisponibilidade de área agrícola para recebimento do lodo (Bittencourt, 2023; Ribeiro *et al.*, 2024).

Além da complexidade logística, os custos associados ao tratamento e destinação de lodos, podem representar uma parcela significativa das despesas operacionais de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Embora o lodo de esgoto corresponda a apenas 1% a 2% do volume total de esgoto tratado, sua gestão pode representar de 20% a 60% dos custos operacionais de uma ETE. Além do impacto econômico, a sua destinação final do lodo de esgoto é um processo complexo (von Sperling; Andreoli, 2014; Cerqueira; Aisse, 2021). No Brasil, por exemplo, quase

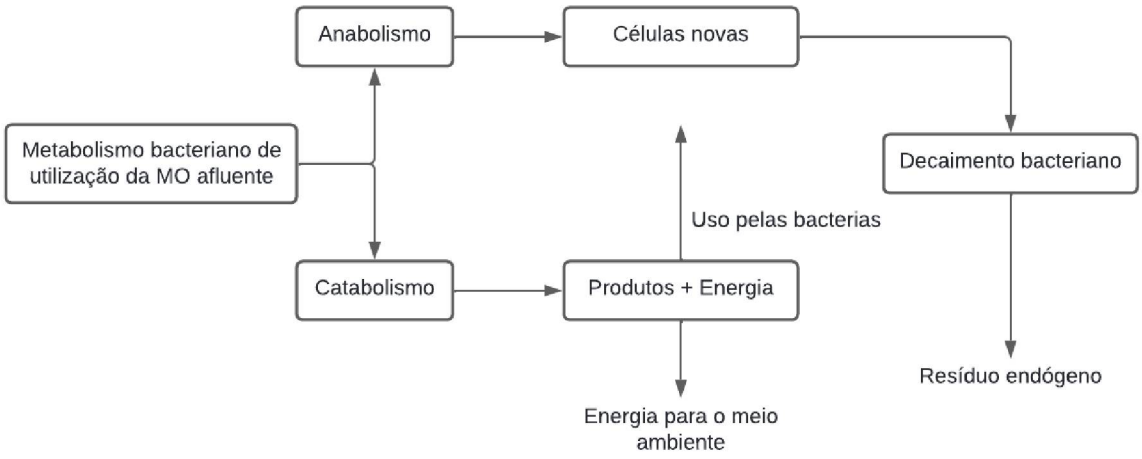
100% dos lodos são dispostos em aterros sanitários, o que agrava ainda mais o problema ambiental (de Faria *et al.*, 2020).

2.1.1 Geração e produção de lodos de esgoto

Umas das finalidades do tratamento de esgoto doméstico é a remoção do material orgânico, material particulado, dissolvido ou suspenso, e como subproduto do processo desse tratamento ocorre a geração do lodo, cujas características são consequências da composição do esgoto afluente ao tratamento do sistema de tratamento implantado e do método de operação adotado (Metcalf & Eddy, 2014).

Nos sistemas de tratamento biológico de esgoto, ocorre a degradação da matéria orgânica pelas bactérias heterotróficas. Essas bactérias utilizam a matéria orgânica como fonte material e energia, gerando o lodo biológico. Esse processo é fundamentado em dois processos essenciais: anabolismo e catabolismo. A FIGURA 1 mostra a representação esquemática de como funciona o metabolismo bacteriano durante utilização da matéria orgânica (MO) pelas bactérias heterotróficas.

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO METABOLISMO DE BACTÉRIAS HETEROTRÓFICAS



FONTE: van Haandel e Além Sobrinho (2006).

Essa interação entre anabolismo e catabolismo é crucial para o funcionamento dos processos biológicos no tratamento de esgoto e na formação do lodo resultante (von Sperling, 2016).

a) Anabolismo (ou assimilação): Nesse processo as bactérias transformam a matéria orgânica em massa celular, ocorrendo a produção de novas células bacterianas a partir desta transformação do material orgânico disponível na massa celular. No entanto, o anabolismo não ocorre espontaneamente; ele depende de energia química para as bactérias.
b) Catabolismo (ou desassimilação): As bactérias convertem a matéria orgânica em produtos estabilizados, fornecendo a energia necessária para sustentar o anabolismo. O catabolismo também está associado à perda de massa celular pelo decaimento bacteriano.

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. O catabolismo pode ser distinguido em dois processos: oxidativo e fermentativo. No processo oxidativo, o material orgânico é oxidado por compostos extracelulares, como O_2, NO_3^- e SO_4^{2-}, liberando CO_2 e água como subprodutos. No fermentativo, especificando-se para a digestão anaeróbia, a matéria orgânica inicial é transformada em CO_2 e CH_4.

A energia disponível para o anabolismo é maior para as bactérias que usam o catabolismo oxidativo (bactérias aeróbias), pois para as bactérias fermentativas (bactérias anaeróbias) grande parte da energia química, originalmente presente na matéria orgânica fermentada, permanece contida no metano (CH_4). Com a maior disponibilidade de energia nos processos aeróbios de tratamento, a atividade anabólica será maior que nos sistemas anaeróbios, explicando menor taxa de crescimento bacteriano nos processos anaeróbios em relação aos aeróbios (von Sperling, 2016).

Há ainda que se considerar o decaimento bacteriano, ocorrido quando as próprias células das bactérias são utilizadas como alimento pelas mesmas, o que se denomina respiração endógena. Em sistemas aeróbios, o decaimento bacteriano ocorre com uma taxa de 1% por hora, dependendo da temperatura. Já nos sistemas anaeróbios, esse processo é mais lento. No metabolismo aeróbio, a oxidação da massa celular é chamada de respiração endógena, enquanto a oxidação da matéria orgânica extracelular é denominada respiração exógena. O resíduo resultante da massa bacteriana decaída, que não é biodegradável (ou seja, não oxidada), é chamado de resíduo endógeno e se acumula no sistema de tratamento. Portanto, a

rigor, deve-se considerar apenas a fração biodegradável presente no lodo sujeita à respiração endógena (von Sperling, 2016).

Os processos do metabolismo bacteriano em sistemas de tratamento de lodo 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 metabolizado e acaba descarregada no efluente.

2.1.2 Composição e tratamento do lodo de esgoto

O lodo de esgoto pode apresentar um teor de sólidos variável, dependendo da tecnologia empregada na sua formação e nos processos de tratamento de lodo utilizados, conforme mostra a TABELA 1. De modo geral, trata-se de uma matriz complexa composto por matéria orgânica, microrganismos, nutrientes, metais pesados e compostos tóxicos. A fração orgânica é predominantemente constituída por carboidratos, cerca de 25% a 50% da fração orgânica, proteínas, cerca de 40% a 60% da fração orgânica, e lipídios, cerca de 10% da fração orgânica, oriundos, principalmente, da decomposição da matéria orgânica presente no esgoto (Jordão; Pessôa, 2017). Além disso, o lodo abriga uma grande diversidade de microrganismos, incluindo bactérias patogênicas, vírus, protozoários e ovos de helmintos, que representam potenciais riscos à saúde pública e ao meio ambiente. Por outro lado, os nutrientes presentes no lodo, como nitrogênio, fósforo e potássio podem beneficiar a agricultura ao atuar como fertilizantes naturais. No entanto, a presença de metais pesados como chumbo, mercúrio, cádmio e arsênio pode restringir sua aplicação no solo, uma vez que esses elementos tendem a se acumular na cadeia alimentar ocasionando impactos ambientais a longo prazo (Sidhu; Toze, 2009; Bittencourt, 2014; Zhang *et al.*, 2025).

A TABELA 1 apresenta os valores de teor de sólidos de lodo de esgoto em diferentes fases e sistemas de tratamento após, processos de adensamento e desaguamento.

TABELA 1 - TEOR DE SÓLIDOS DO LODO DE DIVERSOS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Teor de sólidos (%ST)					
Sistema	Lodo removido da fase líquida	Lodo adensado		Lodo desaguado	
		Gravidade	Centrífuga	Leito de secagem	Centrífuga
Tratamento primário	2 – 6	4 – 8	-	35 – 40	25 – 35
Reator UASB	3 - 6	-	-	30 – 45	20 – 30
Lodos ativados convencional	1 – 2	3 – 7	4 – 8	30 – 40	20 – 30
Lodos ativados aeração prolongada	0,8 – 1,2	2 – 3	3 – 6	25 – 35	15 – 20
Lagoa anaeróbia	15 – 20	-		30 – 40	-
Lagoa facultativa	5 – 15	-		30 – 40	-
Tanque séptico + filtro anaeróbio	1,5 – 5,4	-		30 - 40	-

FONTE: von Sperling e Gonçalves (2014).

Os sólidos presentes no lodo de esgoto variam conforme o sistema de tratamento e tecnologias de pós-tratamento adotadas pela ETE. Esses sólidos são denominados sólidos totais (ST), os quais se subdividem em sólidos suspensos totais (SST) e sólidos dissolvidos totais (SDT). Além disso, em relação à matéria orgânica, os ST, tanto os SST quanto os SDT, podem ser classificados em sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV). Segundo von Sperling e Gonçalves (2014) e Apha (2017), a classificação dos sólidos totais é explicada da seguinte maneira:

a) Sólidos Suspensos Totais (SST): representam a fração de sólidos não dissolvidos na água, permanecendo em suspensão, é a porção de sólidos totais que fica retida por um filtro de tamanho de poro menor ou igual a 2,0µm. Essa categoria inclui partículas orgânicas e inorgânicas, como lodo, areia, argila e outros materiais. A análise de SST é amplamente utilizada para avaliar a qualidade do lodo e a eficiência dos processos de tratamento e realizada através de retenções em filtros;
b) Sólidos Dissolvidos Totais (SDT): correspondem aos sólidos dissolvidos na água, invisíveis a olho nu, é a porção de sólidos totais que passa por um filtro de tamanho de poro menor ou igual a 2,0µm. Englobam íons, compostos orgânicos solúveis e outras substâncias que atravessam filtros finos. A análise de SDT é essencial para compreender a composição química da água e do lodo;

c) Sólidos Voláteis (SV): representam a fração orgânica dos sólidos totais que pode ser volatilizada quando submetida a altas temperaturas. Incluem matéria orgânica biodegradável, como proteínas, carboidratos e lipídios. A análise de SV auxilia na estimativa da quantidade de matéria orgânica presente no lodo e de sua capacidade de decomposição;
d) Sólidos Fixos (SF): correspondem à fração não volátil dos sólidos totais, suspensos ou dissolvidos, englobando minerais, metais, sílica e outros materiais inorgânicos. Por não serem facilmente degradáveis, os sólidos fixos permanecem no lodo após o tratamento. A análise de SF é útil para compreender a composição mineral do lodo e sua estabilidade.

Desta forma, os sólidos presentes no lodo podem ser classificados em quatro categoria principais: sólidos suspensos voláteis (SSV), sólidos suspensos fixos (SSF), sólidos dissolvidos voláteis (SDV) e sólidos dissolvidos fixos (SDF), que, em conjunto, compõem os sólidos totais (ST). Além disso, a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais (SV/ST) é um indicador relevante da fração orgânica do lodo, pois expressa a proporção de matéria orgânica em relação ao total de sólidos presentes.

2.1.3 Formas de tratamento do lodo de esgoto

Para adequar o lodo ao seu destino final, é necessário implementar uma série de etapas de tratamento, que variam conforme as características do lodo, o tipo de processo de tratamento da ETE e os objetivos de destinação final (Boratto; von Sperling, 2023). Essas etapas incluem a desidratação, a estabilização, a remoção de patógenos e a destinação final. Conforme destacado por von Sperling e Gonçalves (2014), o tratamento do lodo de esgoto envolve as seguintes etapas: adensamento, estabilização, condicionamento, desaguamento e higienização.

2.1.3.1 Adensamento

Etapa física no tratamento de lodo de esgoto que visa à remoção parcial da umidade contida no lodo, promovendo a redução do seu volume. Essa redução facilita o manuseio, o processamento e o transporte, além de contribuir para a otimização dos

custos operacionais nas etapas subsequentes (Metcalf & Eddy, 2014). O processo de adensamento pode ser realizado por meio de diferentes técnicas, como a sedimentação gravitacional em tanques específicos, a flotação por ar dissolvidos ou métodos mecânicos, tais como centrifugação e uso de filtros rotativos (Gonçalves; Luduvice; von Sperling, 2014).

A sedimentação gravitacional é um dos métodos mais comuns, baseado na separação sólido-líquido pela ação da gravidade, enquanto a flotação por ar dissolvido utiliza microbolhas de ar para arrastar as partículas sólidas para a superfície, facilitando sua remoção (Gonçalves; Luduvice; von Sperling, 2014). Já os processos mecânicos, como centrifugação e os filtros rotativos, são mais eficientes em termos de tempo e capacidade de desaguamento, mas demandam maior consumo de energia (Cerqueira; Aisse, 2021; Boratto; von Sperling, 2023).

A redução do volume de lodo a ser tratado pelo processo de adensamento faz com que ocorra a diminuição do uso de produtos químicos nas etapas subsequentes de condicionamento e desaguamento, gerando uma diminuição de impactos em relação à custos na aquisição destes produtos, além de diminuição de custos associado ao transporte e disposição final, haja visto que ocorre uma diminuição do volume do lodo. A eficiência desta etapa também influencia o desempenho de processos como digestão e secagem térmica, logo se torna uma etapa essencial para o gerenciamento do lodo de esgoto (Gonçalves; Luduvice; von Sperling, 2014).

2.1.3.2 Estabilização

Etapa do processo de tratamento de lodo de esgoto, cujo principal objetivo é a promoção da degradação da matéria orgânica biodegradável. Dessa maneira, esse processo minimiza a presença de organismos patogênicos, controla odores desagradáveis e diminui o potencial de putrefação, tornando o lodo mais seguro para manipulação, transporte e destinação final (Metcalf & Eddy, 2014).

A estabilização pode ser realizada por métodos biológicos, químicos ou térmicos. Entre os métodos biológicos, destacam-se a digestão aeróbia e a digestão anaeróbia, ambos produzem biossólidos com restrições de uso na agricultura, necessitando de um processo de higienização para utilização irrestrita na agricultura. Na digestão aeróbia, a matéria orgânica é degradada por microrganismos na presença de oxigênio, resultando em um lodo mais estável e com menor teor de sólidos voláteis.

Já a digestão anaeróbia ocorre na ausência de oxigênio, produzindo biogás como subproduto, o que pode ser aproveitado como fonte de energia renovável (Luduvice, 2014).

Os métodos químicos de estabilização incluem a estabilização alcalina, no qual o pH do lodo é elevado para valores superiores a 12 por meio da adição de agentes alcalinizantes, como cal virgem (óxido de cálcio) ou cal hidratada (hidróxido de cálcio) ou outros agentes alcalinizantes (González-Tolivia *et al.*, 2022; Mora; Mejía, 2024). Esse aumento de pH promove a inativação de microrganismos patogênicos, a redução de odores e o aumento da estabilidade do lodo, tornando-o adequado para uso agrícola (Lopes *et al.*, 2020). A estabilização alcalina é particularmente vantajosa devido à sua simplicidade operacional e à capacidade de produzir um lodo com característica adequadas para diversas formas de destinação, tanto destinação agrícola, quanto disposição em aterros, e quando combinada a processos de desaguamento mecanizado apresenta uma vantagem de custos em relações a outros processos de estabilização, haja visto que o processo de estabilização alcalina, também, promove a redução de patógenos (Cerqueira; Aisse, 2021; Boratto; von Sperling, 2023).

2.1.3.3 Condicionamento

Etapa importante no tratamento do lodo para o desaguamento, na qual melhora a separação entre a fração sólida e a líquida. Essa etapa pode ser realizada por meio de métodos químicos ou térmicos, dependendo das características do lodo e dos objetivos do tratamento (Metcalf & Eddy, 2014).

No condicionamento químico, são adicionados coagulantes ou floculantes ao lodo para promover a aglomeração das partículas sólidas, facilitando a liberação da água intersticial. Os produtos químicos mais utilizados incluem polímeros orgânicos sintéticos, que atuam como floculantes, e sais metálicos, como cloreto férrico ($FeCl_3$) e sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3$), que funcionam como coagulantes. Esses agentes químicos alteram as propriedades superficiais das partículas, aumentando o tamanho dos flocos e, consequentemente, a eficiência dos processos de desaguamento, como centrifugação e filtração (Xing *et al.*, 2023).

O condicionamento térmico envolve a aplicação de calor ao lodo. Esse processo altera a estrutura física do lodo, rompendo as células microbianas e

liberando a água ligada, o que facilita sua remoção as etapas subsequentes (Li *et al.*, 2024). Embora o condicionamento térmico seja mais eficiente em termos de desaguamento, ele demanda maior consumo de energia e investimentos em equipamentos, sendo mais indicado para grandes estações de tratamento, que atendam populações maiores que 500.000 habitantes com utilizações de secadores térmicos, principalmente, com uso de biogás gerado na própria planta da estação (Boratto; von Sperling, 2023).

2.1.3.4 Desaguamento

Etapa no tratamento de lodo de esgoto cujo objetivo é a remoção da fração líquida remanescente, reduzindo de maneira mais significativa o volume do lodo e conferindo-lhe características mais próximas às de um sólido. Essa redução de volume é fundamental para viabilizar o transporte, o armazenamento e a destinação do lodo, assim, minimizando os impactos ambientais e os custos logísticos associados (Metcalf & Eddy, 2014).

Diferentes tecnologias podem ser empregadas no desaguamento, como:

a) Filtros-presa: utilizam pressão para forçar a passagem da água através de um meio filtrante, resultando em um lodo com alto teor de sólidos (em torno de 30% a 40% de ST), operam em bateladas, o que exigem a intervenção de mão de obra treinada, porém resulta em torta com altas concentrações de sólidos, pouca exigência de produtos químicos pelo processo anterior de condicionamento e efluente líquido clarificado. Esse método é eficiente, mas demanda alto consumo de energia, manutenção regular e a exigência de mão de obra treinada (Gonçalves; Luduvice; von Sperling, 2014).
b) Centrífugas: empregam a força centrífuga para separar a fase sólida da líquida, produzindo um lodo com teor de sólido entre 20% e 30%. São equipamentos compactos e de alta eficiência, mas também consomem energia de forma significativa. Porém o uso de centrífuga em lodos destinados a estabilização alcalina para transformação em biossólido apresentam os melhores custos inferiores para ETE's de médio porte com atendimento de 50.000 a 100.000 habitantes (Boratto; von Sperling, 2023).

c) Leitos de secagem: consistem em área abertas onde o lodo é espalhado para secagem natural por evaporação e drenagem. Esse método é econômico, mas depende das condições climáticas e exige grandes áreas disponíveis. Considerando os demais mecanismos de desaguamento o leito de secagem é a tecnologia mais econômica (Cerqueira; Aisse, 2021).
d) Geotêxtis: utilizam mantas permeáveis que retêm os sólidos enquanto permitem a passagem da água. São alternativas de baixo custo e fácil operação, especialmente para pequenas estações de tratamento, porém apresenta custo elevado (Boratto; von Sperling, 2023).

2.1.3.5 Higienização

Etapa no tratamento de lodo de esgoto, cujo objetivo principal é a redução ou inativação de microrganismos patogênicos, como bactérias, vírus, protozoários e ovos de helmintos. Esse processo é essencial para garantir a segurança sanitária do lodo, especialmente quando destinado ao uso agrícola, evitando riscos à saúde pública e ao meio ambiente (Metcalf & Eddy, 2014; Pinto, 2014)

Diversos métodos podem ser empregados para a higienização do lodo, entre os mais comuns, destacam-se:

a) Tratamento térmico: a aplicação de calor em temperaturas elevadas por um tempo de exposição determinado é eficaz na inativação de patógenos, pois desnatura proteínas e enzimas essenciais para a sobrevivência dos microrganismos (Pinto, 2014).
b) Exposição ao sol em leitos de secagem: a radiação solar e o ressecamento prolongado nos leitos de secagem contribuem para a redução de patógenos, embora esse método dependa de condições climáticas favoráveis e de um tempo de exposição prolongado (Pompeo, 2015).
c) Estabilização alcalina com cal: a adição de cal virgem ou cal hidratada que eleva o pH do lodo para valores superiores a 12, criando um ambiente hostil que reduz a maioria dos patógenos (Mora; Mejía, 2024).

d) Tratamento químico com ureia: este método envolve a adição de ureia ao lodo. A ureia é hidrolisada pela enzima ureasea em amônia e carbonato. A formação desses produtos eleva o pH do meio e gera amônia livre NH_3, ambos contribuindo para a inativação de microrganismos. A amônia no lodo existe em equilíbrio entre a forma não ionizada, que possui efeito antimicrobiano e pode penetrar as membranas celulares, e a forma ionizada (íon amônio, NH_4^+), que é menos tóxica e atua como nutriente. Assim a eficácia da higienização com ureia baseia-se no efeito combinado do pH elevado e da ação tóxica da amônia não ionizada (Nordin, 2010; Magri *et al.*, 2015).
e) Radiação: o uso de radiação ultravioleta (UV) ou outras formas de radiação ionizante que pode ser empregado para destruir microrganismos, embora esse método seja menos comum devido aos custos e à complexidade operacional (Pinto, 2014).

2.2 PATÓGENOS DE LODO DE ESGOTO

Patógenos são organismos capazes de causar doenças em seres vivos, como vírus, bactérias, fungos ou protozoários, através da capacidade de invadir o organismo hospedeiro, multiplicar-se e desencadear infecções, resultando em sintomas clínicos e, em alguns casos, complicações graves. Esses agentes estão presentes no esgoto doméstico e acabam chegando ao lodo de esgoto (Lopes *et al.*, 2020; Zhan *et al.*, 2024). As doenças e sintomas advindos dos patógenos contidos no lodo são contraídos pelos seres humanos, após uma dosagem infecciosa que seja suficiente para desencadear uma infecção. Esta dosagem depende de cada microrganismo e da capacidade de neutralizá-lo de cada pessoa.

No contexto do tratamento de lodo de esgoto proveniente de estações de tratamento de efluentes domésticos, a disseminação de agentes patogênicos está intimamente ligada às atividades humanas e às condições de saneamento básico. Além disso, a presença de animais na rede de esgoto, especialmente roedores, também é destacada como uma possível fonte de patógenos. Muitos microrganismos causadores de doenças em humanos, predominantemente provenientes de fezes humanas, têm a capacidade de se infiltrar nos biossólidos, logo a quantidade e a

variedade de microrganismos presentes nos biossólidos são influenciadas pelo estado de saúde da população de origem (Andreoli; Pegorini; Fernandes, 2014; Pinto, 2014).

A presença de patógenos representa um risco significativo à saúde pública e ao meio ambiente, especialmente quando o biossólido é destinado a aplicações agrícolas ou a recuperação de solos, haja visto o contato humano com o material. Assim, os processos de higienização do lodo, que visam sua conversão em biossólido, têm como objetivo principal a redução da carga patogênica a níveis seguros, de acordo com normas sanitárias, regulamentações e resoluções vigentes. A eficácia do processo de higienização garante um manuseio seguro, viabilizando uma destinação ambientalmente adequada (Andreoli; Pegorini; Fernandes, 2014).

Entretanto, a identificação abrangente de todos os microrganismos patogênicos no biossólido, que confirme o processo de higienização, é inviável devido à limitação de técnicas de detecção e identificação específicas que cada patógeno requer. Além do mais, a quantificação torna-se dispendiosa e demorada, devido à ocorrência intermitente e em baixas concentrações da maioria dos patógenos. Diante desses desafios, a utilização de microrganismos indicadores tem sido uma estratégia amplamente adotada, pois organismos presentes de forma consistente nas fezes servem como indicadores preditivos da presença patógenos em biossólidos (Sidhu; Toze, 2009). Entre os indicadores mais utilizados em estudos acadêmicos estão os coliformes termotolerantes e as bactérias do gênero *Salmonella spp*. que são frequentemente empregados como indicadores da contaminação fecal e da presença de patógenos de interesse sanitário (Mora; Mejía, 2024; Cuetero-Martínez *et al*., 2023; el Hayany *et al*., 2021). Adicionalmente, ovos de helmintos viáveis são utilizados como parâmetro para avaliar a eficiência dos processos de higienização do lodo de esgoto, uma vez que possuem alta resistência, por conta de sua característica fisiológica, tornando sua remoção mais difícil (Bina; Movahedian; Kord, 2004; Pecson *et al*., 2007; Silva *et al*., 2023).

As regulamentações que, indicam as tecnologias a serem adotadas para conversão de lodo em biossólido, as análises dos agentes patogênicos com seus parâmetros máximos permitido para cada classe e requisitos sobre atrações de vetores. O biossólido classe A deverá atender aos limites de poluentes, aos padrões de monitoramento de patógenos e a um requisito de atração de vetores.

De acordo com a Usepa (2023), os patógenos nos sistemas entéricos humanos, bem como em outras espécies animais, representam uma preocupação

significativa para a saúde pública, especialmente no contexto do manejo de lodo de esgoto e/ou biossólido.

O QUADRO 1 mostra os limites máximos permitidos quanto a presença de organismos patogênicos em biossólido "Classe A" de alguns países, conforme suas legislações. Todos os países apresentados no QUADRO 1 adotam limites máximos permitidos para coliformes termotolerantes, com exceção do Brasil que adota a E.coli como principal parâmetro bacteriológico. Nem todos os países levam em consideração todos os agentes patogênicos apresentados.

QUADRO 1 – LIMITE DE PATÓGENOS PARA OBTENÇÃO DE BIOSSÓLIDO "CLASSE A" DE ACORDO COM AS LEGISLAÇÕES DE CADA PAÍS

Países	Coliformes Termotolerantes	*Salmonella* spp	Ovos viáveis de helmintos	Vírus
[1] Brasil	>10^3 *E.coli* / g.ST	-	>1 ovo viável de helminto / g.ST	-
[2] EUA	>1000 NMP / g.ST	>3 NMP / 4g.ST	>1 ovo viável de helminto / 4g.ST	> UFP/ 4g.ST
[3] União Europeia	>1000 UFC / g.ST	Ausência para uma amostra de 25mL	-	-
[4] México	>1000 NMP / g.ST	>3 NMP / g.ST	>1 ovo viável de helminto / g.ST	-
[5] Costa Rica	>2000 UFC / g.ST	-	>1 ovo viável de helminto / g.ST	-

FONTE: [1]Brasil (2020); [2]Usepa (1994); [3]Eec (1986); [4]Semanart (2003); [5]De-39316s (2015)

O QUADRO 2 apresenta os principais agentes patogênicos presentes no lodo, separados por bactérias, vírus entéricos e vermes de helmintos, e doenças vinculadas a estes patógenos.

QUADRO 2 – AGENTES PATOGÊNICOS PRESENTES NO LODO DE ESGOTO, SUAS DOENÇAS E SINTOMAS CORRELATOS

Organismo	Doença/Sintomas
Bactéria	
Salmonella sp.	Salmonelose (intoxicação alimentar), febre tifoide
Shigella sp.	Disenteria bacilar

Yersinia sp.	Gastroenterite aguda (incluindo diarreia e dores abdominais)
Vibrio cholerae	Cólera
Escherichia coli (cepas patogênicas)	Gastroenterite
Virus Entéricos e enterovírus	
Vírus da hepatite A	Hepatite infecciosa
Norwalk e vírus do tipo Norwalk	Gastroenterite epidêmica com diarreia severa
Rota vírus	Gastroenterite aguda com diarreia severa
Poliovírus	Poliomielite
Caxsackievirus	Meningite, pneumonia, hepatite, febre, sintomas semelhantes ao resfriado, etc
Ecovírus	Meningite, paralisia, encefalite, febre, sintomas semelhantes ao resfriado, diarreia etc.
Reovírus	Infecção respiratória, gastroenterite
Astrovírus	Gastroenterite epidêmica
Calicivirus	Gastroenterite epidêmica
Vermes de helmintos	
Ascaris lumbricoides	Distúrbios digestivos e nutricional, dores abdominais, vômitos. Pode produzir sintomas como tosse, dor no peito, e febre
Ascaris suum	
Toxocara canis	Febre, desconforto abdominal, dor muscular, sintomas neurológicos
Taenia saginata	Nervosismo, insônia, anorexia, dores abdominais, distúrbios digestivos
Taenia solium	Nervosismo, insônia, anorexia, dores abdominais, distúrbios digestivos

FONTE: Usepa (2023).

2.2.1 Patógenos bacterianos

Os indicadores bacterianos devem atender critérios de universalidade, facilidade de detecção, estabilidade, relações com outros microrganismos, respostas rápidas às mudanças ambientais e quantificação confiável. Contudo, os indicadores de patógenos bacterianos em lodos e biossólidos precisam apresentar mais alguns critérios, como: presença em material fecal, incapacidade de multiplicação fora do organismo hospedeiro e resistência aos processos de tratamento de lodo (Who, 2022;

Usepa, 2023). No entanto, não existe um único grupo de microrganismos que atende a todos os critérios, Sidhu e Toze (2009) destacaram, ao abordar sobre indicadores bacterianos tradicionais, que os coliformes termotolerantes e os estreptococos fecais são frequentemente empregados como indicadores da presença de patógenos em biossólidos. Esses microrganismos possuem as características desejadas para avaliar a qualidade e segurança desses resíduos.

A família Enterobacteriaceae, conhecida como enterobactérias inclui os gêneros *Salmonella* e *Enterococcus*, bem como o grupo dos coliformes totais, sendo considerados bons indicadores de contaminação fecal. Esses microrganismos são frequentemente encontrados em grandes quantidades na rede de esgoto. Além disso, eles não são encontrados naturalmente em solos e águas não poluídas, mas estão presentes no lodo de esgoto sanitário e demonstram resistência às condições adversas (von Sperling, 2014). Além do grupo de coliformes totais e das bactérias do gênero *Salmonella spp.,* as enterobactérias também abrigam a bactéria parasita, do gênero *Shigella*, bem como oportunistas ou patógenos ocasionais, como as do gênero *Proteus* e *Klebsiella* (Sidhu; Toze, 2009).

O grupo coliforme é amplamente utilizado como indicador microbiológico na avaliação da qualidade do biossólido (Popova *et al.*, 2014; Lopes *et al.*, 2020; Chaudhary; Gough, 2021; Mora; Mejía, 2024). A presença dessas bactérias sugere possível contaminação fecal e, consequentemente, a existência de patógenos entéricos. Os coliformes totais compreendem todos os bacilos gram-negativos, aeróbios ou anaeróbios facultativos, não esporulados, capazes de fermentar lactose com produção de ácidos e gás a temperaturas entre 35°C e 37°C. No entanto, sua presença não está necessariamente associada à contaminação fecal, pois esses microrganismos também podem ser encontrados em ambientes naturais e organismos de vida livre. Já os coliformes termotolerantes representam um subgrupo dos coliformes totais, distinguindo-se pela capacidade de crescer a 44,5°C. Embora sejam predominantemente originários do trato intestinal de animais de sangue quente, algumas espécies podem ser encontradas em ambientes externos, o que significa que sua presença, por si só, não garante contaminação fecal. Entre as espécies mais representativas desse grupo estão a *Escherichia coli* e *Enterobacter aerogenes*, sendo a primeira considerada o indicador mais confiável de poluição fecal recente em água, lodo e biossólidos (von Sperling, 2014; Who, 2022).

A *Escherichia coli (E.coli),* dentre os coliformes termotolerantes, se destaca como a principal espécie, sendo amplamente utilizada como indicador microbiológico de contaminação de fecal (González-Tolivia *et al*., 2022; Yang *et al*., 2023). A *E.coli* é abundante nas fezes de humanos e animais, estando presente em corpo d'água sujeito à poluição recente por atividades antropogênicas, esgotos, efluentes tratados e lodo de esgoto. Diferentemente dos coliformes totais e termotolerantes, cuja presença pode ter origem ambiental, *E. coli* é o único organismo desse grupo cuja detecção indica inequivocamente a contaminação fecal. No entanto, sua identificação não distingue a origem específica da contaminação, uma vez que essa bactéria é encontrada tanto em dejetos humanos quanto em excretas de outros animais. Além desse papel como indicador microbiológico, algumas cepas de E.coli são patogênicas, podendo causar infecções entéricas e extraintestinais. Entretanto, essas bactérias também desempenham um papel crucial na manutenção fisiológica intestinal, atuando como agentes protetores que impedem a colonização e a proliferação de microrganismos oportunistas (von Sperling, 2014; Who, 2022). Apesar dessa dualidade, a espécie continua sendo amplamente utilizada como parâmetro na avaliação da qualidade microbiológica de águas e biossólidos, dada sua especificidade fecal e sua relevância na vigilância sanitária.

Assim como a E.coli, as salmonelas são encontradas no trato intestinal de vários animais, especialmente aves domésticas, porcos, bovinos e até animais selvagens (Oludairo *et al*., 2023). O gênero *Salmonella* spp. é notável por sua capacidade de sobreviver em condições adversas do ambiente e multiplicar-se fora de seus hospedeiros. Essas bactérias podem ser aeróbias ou anaeróbias facultativas e crescem a uma temperatura igual ou inferior a 37 ºC, mas também podem se desenvolver a 43 ºC. Além disso, elas podem permanecer viáveis por vários dias em lodo de esgoto e em processos mais simples de tratamento de lodo (el Hayany *et al*., 2021).

Contudo, segundo (Usepa, 2023) a salmonela na maioria das situações não é um organismo indicador de tratamento ideal porque é encontrada em baixas concentrações na maioria dos lodos brutos e, portanto, sua ausência no lodo de esgoto tratado pode não ser correlacionada com o tratamento adequado. Outro atenuante são os métodos para detecção de Salmonella sp., que são pouco robustos, dispendiosos em relação ao tempo e são variáveis em comparação com os métodos para medir coliformes termotolerantes.

Dado a presença de patógenos bacterianos no lodo de esgoto, a TABELA 2 apresenta a concentração do grupo coliforme e de salmonela em lodos de diferentes origens. São encontradas diferentes faixas de concentração destes agentes patogênicos, diferentes origens de lodo como aeróbio e anaeróbio, as unidades de medidas são referentes ao método de análise realizado e, por fim, alguns autores não trouxeram faixas de concentração para salmonela, apenas indicaram a presença ou ausência.

TABELA 2 - CONCENTRAÇÃO DE COLIFORMES TERMOTOLERANTES E *SALMONELLAS*

Coliformes termotolerantes			
Origem	**Faixa**	**Unidade**	**Referência**
Lodo de UASB	$9,3 \times 10^6 – 1,7 \times 10^9$	NMP/g ST	Gibbs *et al.* (1995)
	$3,6 \times 10^7$	NMP/g ST	Dahab e Surampalli (2002)
	6,59	Log_{10} NMP/g.ST	Lopes *et al.* (2020)
	$2,50 \times 10^3$	UFC/g	Mora e Mejía (2024)
-	1,3.107 – 1,8	NMP/g.ST	Bina, Movahedian e Kord (2004)
	5	Log_{10} NMP/g.ST	Romanos *et al.* (2019)
Lodo ativado	7	Log_{10} UFC/g.ST	Allievi *et al.* (1994)
	6,50	Log_{10} NMP/g.ST	Lopes *et al.* (2020)
	$11,0 \times 10^3$	NMP/g.ST	Balasundaram *et al.* (2024)
	$4,40 \times 10^8$	UFC/g	Mora e Mejía (2024)
Lodo de lagoa anaeróbia	$8,8 \times 10^8$	UFC/g.ST	el Hayany *et al.* (2021)
Lodo de esterco de porco	6,77	Log_{10} UFC/g.ST	Wong e Selvam, (2009)
***Salmonella* spp.**			
Lodo primário, secundário ou de reator UASB	$1,1x10^1 - 5,9x10^3$	NMP/g.ST	Gibbs *et al.* (1995)
	$3,2 \times 10^2$	'NMP/g.ST	Dahab e Surampalli (2002)
	0,24	Log_{10} NMP/g.ST	Lopes *et al.* (2020)
	Presente	-	Mora e Mejía (2024)
-	54	NMP/4g.ST	Bina, Movahedian e Kord (2004)
	Ausente	-	Romanos *et al.* (2019)
Lodo ativados	1,09	Log_{10} NMP/g.ST	Lopes *et al.* (2020)

	80 Presente	NMP/4g.ST -	Balasundaram *et al.* (2024) Mora e Mejía (2024)
Lodo de lagoa anaeróbia	$5,9\times10^6$	UFC/g.ST	el Hayany *et al.* (2021)
Lodo de esterco de porco	7,32	Log_{10} UFC/g.ST	Wong e Selvam (2009)

2.2.2 Vírus entéricos

A presença de vírus, assim como os demais patógenos no esgoto doméstico e no lodo, depende da saúde populacional e da tecnologia de tratamento utilizado nas ETE's, tanto para a fase líquida, quanto para a fase sólida, haja visto que sua ocorrência está relacionada aos altos níveis de excreção de vírus nas fezes de indivíduas infectados (Sidhu; Toze, 2009). Segundo Gerba e Smith (2005), mais de 150 tipos diferentes de vírus são excretados por seres humanos e podem ser encontrados tanto no esgoto doméstico quanto no lodo. Os vírus são arrastados devido sua agregação e adesão às partículas sólidas presentes no esgoto e durante o tratamento de águas residuárias, logo se concentram, em especial, no lodo de esgoto, e por consequência no biossólido. Apesar de haver registros de números semelhantes de vírus tanto no esgoto, quanto no lodo, podemos considerar que o número de vírus no lodo de esgoto, quando não superior, seria pelo menos semelhante aos relatados nas águas residuárias (Gholipour *et al.*, 2022; Who, 2022).

Os vírus entéricos de importância a saúde pública podem ser divididos em dois grupos: enterovírus, como os (poliovírus, caxsackievírus e ecovírus) e um grupo heterogêneo, como os (rotavírus, calicivírus humanos, astrovírus, adenovírus e vírus da hepatite A e E). Os valores destes vírus podem sofrer variações devido à utilização de metodologia de detecção não padronizada, à falta de técnica analítica, à grande diversidade de lodo de esgoto e aos picos sazonais. Os enterovírus humanos são encontrados nos lodos de esgoto e nos biossólidos (Sidhu; Toze, 2009; Gholipour *et al.*, 2022).

Segundo Gholipour *et al.* (2022), o adenovírus foi o vírus entérico mais frequentemente detectado em amostras de lodo de esgoto, seguido por rotavírus e norovírus. O adenovírus são agentes causadores de diarreias em bebês e produzem infecções em pacientes imunodeprimidos, com mortalidade de casos de até 50%

(Pepper; Brooks; Gerba, 2006). A contaminação adenoviral associada a aplicação de biossólido pode ser através de via respiratória, causando infecção do trato respiratório após inalação do patógeno, ou por ingestão via oral ocasionando infecções gastrointestinais (Rames *et al.*, 2016).

Os rotavírus, astrovírus e o vírus do tipo Norwalk são importantes agentes causadores de gastroenterite aguda em todo o mundo. O rotavírus destaca-se por sua menor propensão à adsorção nas partículas de lodo, o que pode resultar em concentrações relativamente baixas em comparação com outros vírus e por sua grande infecção em crianças entre 3 anos e 5 anos de idade. O vírus é transmitido, principalmente, via oral-fecal e a infecção pelo vírus pode ocasionar vômitos, mal-estar, febre e diarreia, na qual grandes quantidades de partículas virais são excretadas pelas fezes e podem chegar em biossólido (Kittigul; Pombubpa, 2021). Já os astrovírus demonstram capacidade de sobrevivência aos processos de tratamento de águas residuárias, sugerindo que podem estar presentes em lodos em quantidades significativas (le Cann *et al.*, 2004; He *et al.*, 2011). Por fim, os norovírus, representados pelo vírus do tipo Norwalk, são a causa mais comum de gastroenterite aguda, causando morbidade e mortalidade significativas em todo o mundo, principalmente em crianças. Esses vírus são frequentemente detectados em esgotos e em lodo de esgoto, e apresentam remoção limitada durante os tratamentos de esgoto e lodo, o que os torna um risco persistente à saúde pública (Tozzoli *et al.*, 2017; Kittigul *et al.*, 2019).

O vírus da hepatite A (HAV) gera uma infecção humana se houver contato infeccioso, causando doença chamada como hepatite A ou hepatite infecciosa, que geralmente é benigna, mas seu curso sintomático e sua letalidade aumentam com a idade do hospedeiro. O vírus possui distribuição mundial, mas são mais preponderantes em países em desenvolvimento devido a possíveis baixos níveis de saneamento. O HAV é bem estável no esgoto e de difícil remoção durante os processos convencionais de tratamento de águas residuárias (Morace *et al.*, 2002; Gholipour *et al.*, 2022).

2.2.3 Helmintos

Os helmintos são espécies de vida livre e parasitas e as doenças causadas por helmintos são conhecidas como helmintíases. O ciclo de desenvolvimento dos

helmintos é composto por três estágios principais: ovo, fase larval ou juvenil e fase adulta, sendo que a quantidade de estágios larvais pode variar conforme a espécie. Este é um grupo de organismos patogênicos frequentemente encontrados nas fezes humanas, especialmente em regiões com deficiência sanitária. A presença e a quantidade de helmintos em biossólidos variam de acordo com a taxa de infecção predominante na comunidade (Who, 2022). A TABELA 3 mostra os números de ovos viáveis de helmintos dos gêneros Ascaris e origem da tecnologia de tratamento de esgoto da qual esse lodo foi formado.

TABELA 3 - CONCENTRAÇÃO DE OVOS DE HELMINTOS EM LODO

Origem	Valor	Unidade	Referência
Lodo aeróbio e anaeróbio	2 – 53 2 – 45	ovos totais/10g ST ovos viáveis/10g ST	Gantzer *et al.* (2001)
Lodo de esgoto urbano	43 54 – 97	ovos de viáveis/10g.ST ovos viáveis/g.ST	Mignotte-Cadiergues *et al.* (2001) Silva *et al.* (2023)
-	Ausente 135 – 225	- ovos de viáveis/g.ST	Romanos *et al.* (2019) Bina, Movahedian e Kord (2004)
UASB	5	ovos viáveis/g.ST	Pompeo *et al.* (2016)
Lodo de tratamento primário avançado	77,7 – 173,5 54,7 – 105,4	ovos totais/2g.ST ovos viáveis/2g.ST	Pecson *et al.* (2007)
UASB Lodo Ativado	15 Sem detecção	ovos viáveis/4g.ST	Lopes *et al.* (2020)

O ovo de *Ascaris* é o mais comum de se encontrar em biossólidos digeridos, por isso as informações disponíveis sobre a presença e o destino de helmintos em biossólidos geralmente se concentram em *Ascaris*, dado à sua prevalência mais alta em comparação com outros helmintos. O gênero *Ascaris* consiste em duas espécies: *Ascaris lumbricoides*, que parasita humanos, e *Ascaris suum*, que parasita suínos. Essas espécies são notavelmente semelhantes em termos morfológicos e genéticos (Leles *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2014).

O *Ascaris lumbricoides* é o parasita mais comumente encontrado na população e é considerado o principal indicador da qualidade do lodo de esgoto (von Sperling *et al.*, 2003; Sidhu; Toze, 2009). Diversos fatores estão associados a esse aspecto de principal bioindicador, incluindo sua ampla distribuição geográfica, alta prevalência de parasitismo em populações ao redor do mundo, capacidade

relativamente maior de resistir às condições ambientais, baixa dose necessária para infecção e a ausência de imunidade específica permanente nos hospedeiros (Sidhu; Toze, 2009; Leles *et al.*, 2012). Os helmintos são objetos de considerável interesse, devido ao ambiente favorável encontrado nos processos de tratamento de esgoto para a incubação de seus ovos, e porque possuem uma fase de sobrevivência no solo em seus ciclos biológicos normais. Esta classe demonstra uma notável resistência às condições ambientais, o que sugere que ao controlar os helmintos, outros organismos seriam automaticamente mantidos em níveis aceitáveis para o uso agrícola, minimizando os riscos tanto para o ambiente quanto para os usuários do produto final ou biossólido.

Os ovos de helmintos são formados por estruturas bastante resistentes, que são membranas que atuam como barreiras protetoras, conferindo-lhes maior resistência à inativação diante das variações ambientais. A sobreposição dessas membranas resulta em uma estrutura compacta, capaz de suportar condições físicas, químicas e biológica adversas que são proporcionadas pelos processos de higienização do lodo, seja via física, química ou biológica (Wharton, 1983). Essa resistência varia entre as diferentes espécies de helmintos, e suas características de membrana desempenham um papel importante na resposta aos tratamentos (Alouini; Jemli, 2001).

Dada essa característica, os helmintos são avaliados principalmente por meio dos seus ovos. No entanto, essa avaliação não deve ser apenas quantitativa; a viabilidade desses ovos é crucial do ponto de vista epidemiológico. Os ovos fertilizados eliminados nas fezes do hospedeiro não são infecciosos até que se transformem em larvas de segundo estágio dentro do ovo. Somente quando esses ovos são ingeridos por um novo hospedeiro é que liberam suas larvas no intestino delgado, dando continuidade ao ciclo normal para formar parasitas adultos (Leles *et al.*, 2012).

Os ovos de *Ascaris* são resistentes às condições ambientais adversas, podendo permanecer viáveis e infecciosos por vários anos, o que representa um desafio significativo para o tratamento e destinação ambientalmente segura do lodo de esgoto (Nelson; Darby, 2002). A persistência desses patógenos em diferentes matrizes orgânicas tem sido amplamente documentada na literatura. Por exemplo, Mignotte-Cadiergues *et al.* (2001) observou a presença de ovos viáveis em lodo de esgoto mesmo após 60 dias de estocagem e Pecson *et al.* (2007), relatou a

persistência de ovos viáveis por 80 dias. De forma semelhante, Pompeo *et al.* (2016) avaliou a influência da estocagem prolongada na inativação de ovos de *Ascaris* em lodo de fossa séptica e lodo proveniente de reatores UASB, observando sua presença em lodos de tanque séptico e lodo centrifugado de UASB mesmo após 61 semanas de armazenamento, evidenciando a capacidade desses organismos de resistirem à período prolongado em ambientes úmidos e ricos em matéria orgânica.

Silva *et al.* (2023) relatou a presença de ovos viáveis após 21 dias em lodo de esgoto submetido ao processo de compostagem utilizando bagaço de cana, capim e conteúdo ruminal bovino. Além disso, Sanguinetti *et al.* (2005) investigaram a viabilidade de ovos de *Ascaris suum* em biossólidos armazenados em lagos e constataram que esses ovos permaneceram infecciosos por até 20 meses, reforçando a necessidade de protocolos rigorosos para a inativação microbiológica antes do uso agrícola desses resíduos. Esses achados são fundamentais para compreender a resistência dos ovos de helmintos em diferentes condições ambientais e reforçam a necessidade de estratégias eficazes de estabilização e higienização do lodo. Além disso, a persistência prolongada desses patógenos pode ter implicações diretas na gestão de resíduos e na segurança do uso agrícola de biossólidos, demandando estudos adicionais para otimizar métodos de inativação e minimizar os riscos à saúde pública e ao meio ambiente.

2.3 HIGIENIZAÇÃO DO LODO

A higienização, ou processo de redução de patógenos, visa a redução de organismos patogênicos a níveis seguros, na qual é realizada para viabilizar destinações mais seguras sanitariamente do lodo gerado ETE's. Deve-se considerar as restrições de uso do logo higienizado, que devem ser tanto mais rigorosas quanto menor for a eficiência do método de higienização selecionado. Por exemplo, um lodo que visa uma disposição ao aterro sanitário terá exigências sanitárias aquém de lodos destinados a uso em solos, tendo em vista a manipulação, e consequente contato humano, que será feita nesse biossólido e, também, pelos possíveis impactos ambientais negativos que poderiam surgir caso a sanidade não esteja adequada (Pinto, 2014).

2.3.1 Processos de higienização

As tecnologias utilizadas para higienização do lodo variam conforme o nível de sanidade e destinação final se pretende aplicar. As regulamentações nacionais, como as dos EUA (Usepa, 1994), da União Europeia (Eec, 1986) e do Brasil (Brasil, 2020) determinam as especificações para produção de diferentes classes de biossólidos e suas disposições finais, definindo os limites máximos para agentes patogênicos, concentrações de metais pesados, métodos de amostragem e análise, através dos processos de higienização do lodo indicados pelas regulamentações. No que diz respeito à redução de agentes patogênicos em biossólidos, as regulamentações centram-se na Escherichia coli e coliformes termotolerantes (ou coliformes fecais), Salmonella spp., ovos de helmintos e enterovírus.

Segundo Pinto (2014), há um consenso internacional sobre as tecnologias capazes de produzir lodo sanitariamente seguro para aplicação na agricultura. No entanto, as variáveis de controle do processo não são uniformes em todos os países, refletindo a diversidade das condições ambientais e das características específicas do lodo gerado em cada local. Logo, diante de um cenário onde há a ocorrência de organismos patogênicos no lodo de esgoto de ETE's, representando um risco à saúde populacional que venha a ter contato direto ou indireto com o lodo, ressalta-se a importância da realização do processo de higienização. As principais alternativas empregadas para a higienização do lodo de esgoto são: térmicas, química e biológica e radiação.

O térmico concilia as variáveis de tempo e temperatura para atingir a higienização; o químico utiliza a elevação do pH através de produtos alcalinos para alterar a natureza coloidal do protoplasma celular dos microrganismos patogênicos de forma fatal; o biológico utiliza um processo de assimilação da matéria orgânica contida no lodo; e a radiação que utiliza de raios beta e gama para inativar os microrganismos em suas estruturas coloidais celulares, assim como o por via química (Metcalf & Eddy, 2014; Pinto, 2014).

2.3.1.1 Higienização via térmica

Historicamente, a adoção da secagem térmica tem sido observada em ETE's existentes que passam por processos de modernização, especialmente aquelas que

já empregam técnicas de estabilização biológica do lodo, com ênfase na digestão anaeróbia. O avanço da tecnologia despertou, sobretudo na Europa, o interesse de projetistas e concessionárias na aplicação da secagem térmica para o lodo bruto. A exclusão da etapa de estabilização biológica resulta em uma significativa redução nos custos de implantação, ao mesmo tempo em que possibilita a produção de material com maior teor de matéria orgânica e poder calorífico. Essas características agregam valor ao produto, favorecendo sua aplicação na agricultura ou como combustível.

Redução de patógenos por processo térmico concilia as variáveis de tempo de permanência e temperatura para atingir qualidade microbiológica exigida para higienização adequada. Os parâmetros de tempo e temperatura necessários para que um lodo seja considerado higienizado variam de acordo com a forma como esse material entra em contato com o calor, sua concentração de sólidos, a umidade ambiente e sua capacidade de condução térmica. Quando essas condições são atendidas, o tratamento térmico é capaz de inativar e/ou eliminar microrganismos patogênicos, transformando lodo de esgoto em biossólido (Pinto, 2014; Bittencourt *et al.*, 2021; Kuk *et al.*, 2022).

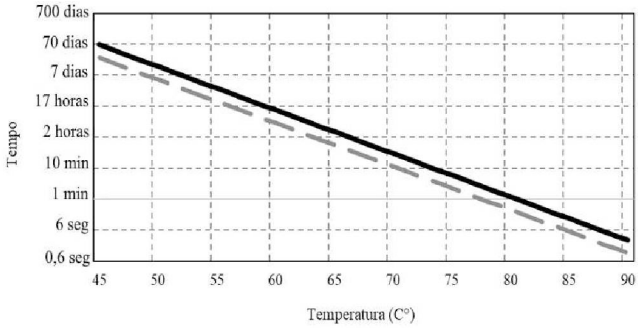
A Resolução CONAMA n° 498/2020 estabelece os regimes de tempo e temperatura necessários para a obtenção do biossólido “Classe A”. A análise da curva de sobrevivência de organismos indicadores de qualidade sanitária sob condições térmicas permite estimar a relação adequada entre o tempo de exposição do lodo e temperaturas específicas, sendo, portanto, um parâmetro fundamental para garantir a eficácia dos processos de higienização por via térmica.

Contudo, além de reduzir patógenos o tratamento térmico é eficaz para: redução de volume, que pode reduzir custos de manuseio, transporte e armazenamento do biossólido; eliminação de odores através da redução da fração orgânica proporcionada pelo aumento da temperatura; destruição de contaminantes, como microplásticos, hormônios e produtos químicos; recuperação de recursos e energia, como nutrientes, tais como carbono e fósforo; e produção de outros subprodutos além de fertilizantes. Para tal, métodos de tratamento térmico como secagem térmica e incineração e tratamentos alternativos como pirólise, gaseificação e hidrotérmico são aplicados. Esses métodos, descritos mais abaixo, são capazes de converter a fração orgânica do lodo de esgoto, ou biossólido em subprodutos: líquidos, como óleos (ou bio-óleo), sólidos, como biochar (ou carvão), e gasosos, como gás de

síntese (ou gás combustível) (Schnell; Horst; Quicker, 2020; Buss, 2021; Wilk; Śliz; Lubieniecki, 2021; Marzbali *et al.*, 2024).

A FIGURA 2 apresenta um gráfico que indica as propostas de regime tempo-temperatura, conforme preconizado pela Resolução CONAMA 498/2020, capazes de reduzir os patógenos a níveis indetectáveis, demonstrando a relação necessária entre esses parâmetros para o enquadramento do biossólido na “Classe A”.

FIGURA 2 - REGIME TEMPO-TEMPERATURA PARA ENQUADRAMENTO DO BIOSSÓLIDO CLASSE A CONFORME PRECONIZADO PELA RESOLUÇÃO CONAMA Nº 498/2020



FONTE: Rietow (2024).

2.3.1.1.1 Secagem térmica

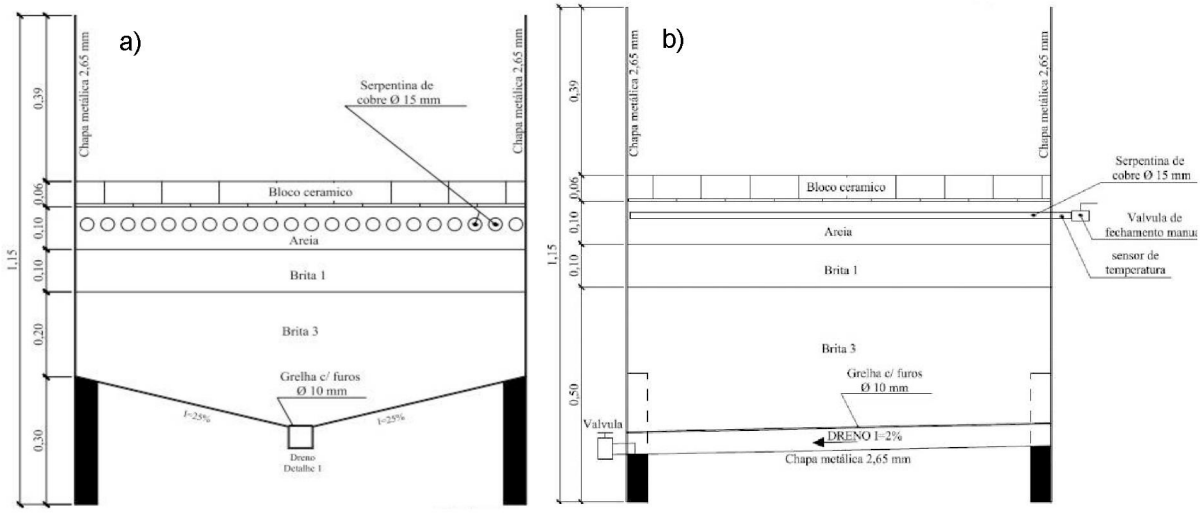
A secagem do lodo é uma etapa essencial no processo de higienização térmica, pois reduz significativamente o teor de umidade, além de aumentar o poder calorífico do material, tornando-o mais adequado para processos subsequentes, como combustão e coprocessamento. Diferentes técnicas podem ser empregadas para a secagem, variando conforme a fonte de calor e o mecanismo de transferência térmica.

A secagem por contato ocorre por meio da transferência indireta de calor, onde o lodo entra em contato com uma superfície aquecida, utilizando vapor, gases de exaustão, água quente ou óleos térmicos como meio de aquecimento. Já a secagem por convecção envolve a transferência direta de calor, promovida pelo contato do lodo com gases quentes ou vapor, facilitando a evaporação da umidade. E por fim, a secagem por radiação utiliza infravermelho, micro-ondas ou até mesmo radiação solar, sendo esta última uma alternativa viável em regiões de alta insolação. Após a secagem, o lodo pode ser submetido à incineração, que engloba todas as formas de combustão direta do material, isoladamente ou em misturas com resíduos

industriais, visando sua redução volumétrica eventual recuperação energética (Schnell; Horst; Quicker, 2020; Kuk *et al.*, 2022).

Rietow (2024) estudou um sistema piloto que funciona como um leito de secagem convencional, conforme mostra a FIGURA 3. Este leito é modificado para promover a secagem e higienização do lodo de forma simultânea, com uma área de 1 m² (1,0 m x 1,0 m). A FIGURA 3 traz a representação esquemática do um leito de secagem convencional modificado, denominado de Sistema Térmico de Higienização do Lodo – STHIL, que foi construído em chapas metálicas galvanizadas com espessura 2,65 mm e revestidas com tinta anticorrosiva para metais.

FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA PILOTO DE LEITO MODIFICADO DE SECAGEM E HIGIENIZAÇÃO TÉRMICA DE FORMA SIMULTÂNEA: A) VISTA FRONTAL E B) VISTA LATERAL



FONTE: Rietow (2024).

Caracterizado pela modificação da camada drenante de um leito de secagem convencional, o sistema apresentado na FIGURA 3 conta com: uma serpentina composta por tubos de cobre; sobre a serpentina, são dispostos blocos cerâmicos semelhantes aos utilizados em leitos de secagem convencionais, formando um piso radiante. Dessa forma, a água quente proveniente do sistema de aquecimento (até 90°C) transfere calor para a serpentina, que, por sua vez, aquece os blocos cerâmicos. O calor residual do processo é então transferido para o lodo depositado sobre o piso radiante. Abaixo da serpentina, são posicionadas camadas de areia e diferentes tipos de brita. O fundo apresenta uma inclinação visando facilitar a drenagem do sistema, incluindo a instalação de um dreno (Kuk *et al.*, 2022).

O STHIL é uma importante alternativa para estações de pequeno porte, visto que o sistema permite a elevação da temperatura por meio de diversas fontes de energia, como o biogás, para promover a secagem e higienização do lodo, podendo apresentar diversas configurações, ser constituído por diversos materiais e ser operado em diferentes condições, a depender das necessidades imputadas pelo sistema de tratamento de esgoto e pelos protocolos de higienização das legislações vigentes quanto a higienização do lodo gerando biossólido.

2.3.1.1.2 Pirólise e gaseificação

A pirólise é um processo termoquímico que ocorre mediante o aquecimento do lodo de esgoto na ausência de oxigênio, ou seja, em um ambiente não reativo e sem a presença de agentes oxidantes. Esse processo acontece em três etapas distintas. A primeira, entre 25°C e 200°C, no qual é caracterizado pela desidratação do lodo e remoção de compostos voláteis leves. Na segunda etapa, na qual ocorre entre 200°C e 600°C, há a degradação térmica de hidrocarbonetos complexos presentes no lodo, resultando na formação de compostos gasosos, líquidos e sólidos ricos em carbono. Já na terceira etapa, em temperaturas acima de 600°C, ocorre a decomposição da fração inorgânica, juntamente da geração de gases estáveis, como hidrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono (W.D. *et al.*, 2018; Thoma *et al.*, 2022).

A gaseificação, por sua vez, ocorre em uma faixa de temperatura entre 800°C e 1200°C, com a introdução controlada de oxigênio sob pressão atmosférica, permitindo uma combustão parcial. Esse processo converte o lodo em biochar e gases combustíveis, que podem ser reaproveitados para alimentar a própria operação térmica, reduzindo a necessidade de fontes externas de energia. O biochar gerado, rico em carbono, pode ter aplicações agrícolas, especialmente como condicionador de solo, contribuindo para a melhoria da retenção de nutrientes e a mitigação de impactos ambientais (W.D. *et al.*, 2018; Nylen; Sheehan, 2023).

2.3.1.2 Higienização via química

A higienização de lodos por meio de processos químicos baseia-se na utilização de agentes alcalinizantes para elevar o pH do lodo de esgoto, promovendo

condições adversas à sobrevivência de microrganismos patogênicos. O aumento do pH altera a estrutura coloidal do protoplasma celular, levando à lise celular e consequente liberação do conteúdo intracelular, resultando na inativação microbiana (Lopes *et al.*, 2020; Andreoli *et al.*, 2022). Diversos compostos alcalinos podem ser empregados nesse processo, incluindo óxido de cálcio, hidróxido de cálcio, peróxido de cálcio, além de resíduos industriais como cinzas volantes e escórias de forno, que apresentam potencial para reduzir a carga microbiana e estabilizar o lodo (González-Tolivia *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2023; Mora; Mejía, 2024). Além de sua aplicação no tratamento de lodos provenientes de efluentes domésticos, esses agentes também podem ser utilizados na higienização de resíduos orgânicos de origem animal, contribuindo para a mitigação de riscos ambientais e sanitários (Wong; Selvam, 2009).

Além dos benefícios diretos da higienização química, a interação entre lodo e o agente alcalinizante pode resultar em transformações físicas e químicas que melhoram suas propriedades para reutilização. O aumento da temperatura gerado por reações exotérmicas potencializa a inativação microbiana, tornando o processo ainda mais eficiente na higienização. Ainda ocorre a redução da umidade, aliada à decomposição da fração orgânica, que contribui para a diminuição do volume do lodo, facilitando o seu manuseio, transporte e armazenamento (Popova *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2008).

2.4 ESTABILIZAÇÃO ALCALINA

Historicamente, ao longo do desenvolvimento humano, a cal tem sido usada como um material de construção essencial; na agricultura, vem sendo usada para corrigir a acidez do solo, melhorando a qualidade do solo para o cultivo; no âmbito da saúde foi usada para desinfetar e higienizar, especialmente em tempos de epidemias e durante surtos de doenças como a cólera, na qual a cal era usada para limpar áreas públicas e privadas e prevenir a propagação da doença; no Egito Antigo, a cal foi usada no processo de mumificação, que ajudava a desidratar os corpos e a prevenir a decomposição, mantendo-o preservado por longos períodos. No contexto atual do saneamento, a cal é usada no tratamento de lodo de esgoto, como parte do processo de estabilização alcalina, para reduzir patógenos e odores antes de sua disposição final ou destinação agrícola (Fisher; Alvarez-Gaitan; Stuetz, 2019).

Um sistema de estabilização alcalina destinado ao tratamento de lodo de esgoto, quando devidamente operado, pode ser utilizada para tratar lodos primários ou digerido, tanto na fase líquida ou sólida e deve demonstrar eficácia para: redução de odores e de agentes patogênicos, como salmonelas, vírus, coliformes termotolerantes e ovos de helmintos (Bittencourt, 2014; Pinto, 2014; Cieślik; Namieśnik; Konieczka, 2015); aprimoramento das propriedades de desaguamento; diminuição dos níveis de nitrogênio por meio da volatilização da amônia; e aumento da alcalinidade total, em consonância com a predominância de solos ácidos na maioria da região brasileira, agregando biossólido produzido, além de oferecer a possibilidade de substituir total ou parcialmente o uso de corretivos agrícolas (Andreoli *et al*., 2001).

Segundo Pinto (2014) destaca-se que com a elevação do pH do lodo, advindo da estabilização alcalina, ocorrem alterações nas características químicas e físicas por meio de reações como hidrólises, saponificações e neutralizações de ácidos. Algumas dessas modificações incluem:

a) Desenvolvimento de uma camada mais rígida e de coloração branca quando exposto ao ambiente externo;
b) Acréscimo na quantidade de massa ao processo de estabilização alcalina, devido a incorporação da cal;
c) Redução de sólidos voláteis (10% - 35%) devido à perda de orgânicos voláteis para atmosfera;
d) Perda de nitrogênio devido à volatilização da amônia causando liberação de fortes odores;
e) Aumento de sólidos totais, resultantes da adição de sólidos da cal e da precipitação de sólidos dissolvidos;
f) Redução nos níveis de fósforo solúvel devido à reação com ortofosfato para formar precipitado de fosfato de cálcio.

Além disso, a alcalinização favorece processos como a hidrólise de compostos orgânicos, aumentando a biodisponibilidade de nutrientes essenciais, enquanto a volatilização do nitrogênio pode influenciar a qualidade do material final, dependendo da estratégia de manejo (Monje *et al*., 2021). Outro efeito importante é a capacidade de alguns agentes alcalinos promover a imobilização ou precipitação de metais pesados, reduzindo sua biodisponibilidade e tornando o biossólido mais seguro para aplicação agrícola. Além do mais, a incorporação de materiais complementares,

como cinzas, resíduos de compostagem e bagaço de cana, pode otimizar a elevação do pH e contribuir para a estruturação do material final, melhorando suas características físico-químicas e seu potencial como condicionador de solo (González-Tolivia *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2023).

A estabilização alcalina é em sua essencial um mecanismo de redução de patógenos de lodos por via química, que visa transformar o lodo em biossólido de maneira segura e com potencial de aplicação agrícola no solo, através da adição de produto alcalinizante, usualmente óxido de cálcio (CaO) e hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), cal virgem e cal hidratada, respectivamente (Popova *et al.*, 2014; Chaudhary; Gough, 2021). Este processo pode alcançar os critérios que as legislações adotam para transformação de lodo em biossólido. Como por exemplo, no Brasil, a Resolução CONAMA 498/2020, define que os critérios e procedimentos para a produção e aplicação de biossólidos deverá atender o limite máximo de 10^3 E.coli/g.ST e adotar algum dos seguintes processos de redução de patógenos, para classificação de biossólido como "Classe A", dentre eles os seguintes processos que levam em conta a higienização por via química, através de meio alcalino elevado: 1) lodo tratado por processos que proporcionem valores elevados de pH e temperatura e; 2) lodo tratado em processos de regime de tempo entre pH e temperatura, conforme mostra o QUADRO 3. Já a classificação para biossólido "Classe B" por via química deverá, apenas, atender ao limite máximo de 10^6 E. coli/g.ST ou, apenas, adotar um processo de redução significativa de patógenos, conforme mostra QUADRO 3 (Brasil, 2020).

Quando o processo de estabilização alcalina do lodo de esgoto é realizado com cal virgem (CaO), ocorre uma reação exotérmica devido à hidratação da cal em contato com a água presente no lodo. Esse processo resulta na formação de cal hidratada ($Ca(OH)_2$), liberando cátions de cálcio (Ca^{2+}) e ânions hidroxila (OH^-), o que eleva significativamente o pH do meio. O calor gerado pela reação aumenta a temperatura da mistura até que toda a cal virgem seja completamente hidratada ou extinta, atingindo a estabilidade térmica. Contudo, há relatos de ocorrências de combustão da cal virgem, em algumas UGL's do estado do Paraná, após a aplicação de cal virgem em lodo de esgoto sob processo de Estabilização Alcalina, conforme pode ser observado pela FIGURA 4.

O QUADRO 3 expõe as alternativas para obtenção de biossólido Classe A e Classe B através de via química e os requisitos a serem atendidos para tal alternativa, através da legislação brasileira relacionada a obtenção de biossólidos.

QUADRO 3 - PROCESSOS PARA OBTENÇÃO DE BIOSSÓLIDOS CLASSE A E CLASSE B CONFORME PRECONIZADO PELA RESOLUÇÃO CONAMA N° 498/2020

Alternativa	Requisitos
Biossólido Classe A	
1 – Lodo tratado por processos que proporcionem valores elevados de pH e temperatura.	Processos que proporcionem elevação do pH (valores acima de 12, por pelo menos 72 horas) e da temperatura (mantida acima de 50° C, por pelo menos 12 horas durante o período em que o pH estiver acima de 12) e secagem do lodo de esgoto sanitário por exposição ao ar, no caso de materiais que permaneçam com teor de ST maior que 50%, após o período de 72 horas da mistura do material alcalino.
2 – Lodo tratado em processos de regime de Tempo X Temperatura ou de pH e temperatura elevados	Esta alternativa depende da validação do processo de tratamento. Deve-se documentar as condições de operação que garantam a obtenção de biossólido com menos de 1 ovo viável de helminto g^{-1} de ST. Demonstrada essa condição, os parâmetros de controle operacional do processo de tratamento podem ser utilizados como indicadores da produção de biossólido Classe A, não sendo mais necessário caracterizar o lodo tratado em termos de ovos de helmintos. Para validação dessa alternativa um plano de amostragem detalhado deve ser submetido ao órgão ambiental competente
Biossólido Classe B	
1 – Lodo tratado em um processo de redução significativa de patógenos	Estabilização com cal, mediante adição de quantidade suficiente para que o pH seja elevado até pelo menos 12, por um período mínimo de duas horas.

FONTE: Brasil (2020).

Por outro lado, quando se utiliza cal hidratada diretamente, não há processo de hidratação e, consequentemente, não ocorre liberação de calor. Nesse caso, ocorre apenas a elevação de pH através da liberação de íons de hidroxila no meio. Dessa forma, a utilização de cal virgem ou cal hidratada impacta diretamente as condições do processo de estabilização alcalina. O uso de cal virgem proporciona dois mecanismos para redução de patógenos: o aumento da temperatura e a elevação do pH. Já a utilização da cal hidratada elimina a etapa exotérmica, oferecendo um ambiente mais controlado e seguro para o processo de estabilização alcalina do lodo de esgoto, porém sem o efeito térmico adicional sobre os microrganismos, apenas elevação de pH (Pegorini *et al.*, 2006a).

FIGURA 4 – LODO EM COMBUSTÃO SOB PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA

FONTE: Sanepar (2025).

Contudo, além da utilização do produto alcalinizante, o tempo de contato entre o lodo e a cal desempenha um papel crucial no efeito de higienização. A manutenção de um pH elevado por períodos prolongados, frequentemente superiores a 30 dias, cria um ambiente inóspito para a proliferação de microrganismos patogênicos, reduzindo significativamente o risco de recontaminação ao longo do tempo (Pinto, 2014; Andreoli *et al.*, 2022).

Outro fator que auxilia para a redução de microrganismos patogênicos no processo de estabilização alcalina é a volatilização da amônia, induzida pelo aumento do pH devido à adição de cal. Nessas condições, o íon amônio (NH_4^+) é convertido em amônia livre (NH_3). A amônia está naturalmente presente nas ETE's, resultante da degradação de proteínas, hidrólise da ureia ou da presença de compostos nitrogenados que chegam à rede de esgoto e, consequentemente, ao lodo gerado no tratamento. O NH_3 por ser uma molécula lipofílica, apresenta maior capacidade de difusão através de membranas biológicas, favorecendo sua ação biocida (Park *et al.*, 2016).

O nitrogênio amoniacal no lodo de esgoto se encontra em equilíbrio dinâmico entre as formas de íon amônio (NH_4^+) e amônia livre (NH_3). Em condições de pH elevado, há um aumento na concentração de íons hidroxila (OH^-), deslocando esse equilíbrio para a formação de NH_3. A amônia, por sua vez, é altamente volátil e reconhecida por sua capacidade de inativar diversos microrganismos presentes no lodo de esgoto. Pecson e Nelson (2005) destacam que o pH elevado, isoladamente, não é o principal fator de inativação, mas desempenha um papel essencial ao

converter o amônio em sua forma não carregada, que é mais tóxica para os microrganismos. Apesar dos vírus não possuírem metabolismo celular próprio, dependendo de um hospedeiro para se replicar, estudos indicam que concentrações elevadas de amônia são capazes de levar à sua inativação (Decrey; Kazama; Kohn, 2016). Além disso, Pecson *et al.* (2007) e McKinley, Parzen e Mercado Guzmán (2012) relatam a inativação de ovos viáveis de Ascaris devido ao efeito biocida da amônia, reforçando sua importância no processo de higienização do lodo de esgoto.

Em relação ao teor de sólidos do lodo no processo de estabilização alcalina, Pegorini *et al.* (2006) apontam que a utilização de lodos com menor teor de sólidos exige doses mais elevadas de cal. Isso ocorre porque, quanto menor a concentração de sólidos totais (ST), maior será a quantidade de cal necessária para elevar o pH da mistura a 12. Por exemplo, um lodo proveniente de um desaguamento mecânico por centrifugação, com teor de ST em torno de 20%, requer uma aplicação mais elevada de cal para atingir o pH desejado em comparação com processos de desaguamento que atingem valores mais elevados de ST.

Além disso, as características do lodo aeróbio ou anaeróbio influenciam diretamente sua resposta à adição de cal. Bittencourt (2014), ao analisar diferentes lotes de lodo no processo de estabilização alcalina por elevação do pH, observou que lodos aeróbios da Região Metropolitana de Curitiba (RMC) atingiram, em média, pH 11,8 após o tratamento, enquanto lotes provenientes do interior do Paraná apresentaram médias de pH significativamente menores, em torno de 8,2, conforme mostra TABELA 4. Os lotes aeróbios da RMC foram advindos da ETE Belém, cuja operação é baseada exclusivamente em processos aeróbios (lodos ativados). Em contrapartida, os lotes de lodo do interior do estado eram mistos com predominância de processos anaeróbios, ainda que submetidos a pós-tratamentos. Em vista disso, lodos anaeróbios tendem a apresentar médias de pH inferiores em comparação aos lodos aeróbios, resultando em menor eficiência na manutenção do pH durante o processo de estabilização alcalina.

A TABELA 4 mostra a média dos parâmetros de pH, sólidos totais e orgânicos, além de nutrientes de lodos aeróbios e anaeróbios de lotes de lodo sob processo de estabilização alcalina.

TABELA 4 - PARÂMETROS EM LOTES DE LODO SOB EFEITOS DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA

Parâmetro	Unidade	Lotes aeróbios (n=84)	Lotes mistos (n=91)	Total de lotes (n=175)
pH_{H2O}		11,8	11,6	11,7
ST	%	34,9	50,8	43,2
SVT	(% de ST)	33,2	20,1	26,4
C_{ORG}		16,2	11,9	13,9
P_{TOTAL}		0,77	0,42	0,58
K_{TOTAL}		0,16	0,10	0,13
Ca_{TOTAL}		18,4	12,9	15,5
Mg_{TOTAL}		3,84	6,0	4,96

NOTA: Os lotes de lodo mistos são predominantemente advindos de tratamentos anaeróbios, seguido de pós-tratamento físico-químico.

FONTE: adaptado Bittencourt (2014).

2.4.1 Estabilização Alcalina Prolongada

Como visto, a aplicação de produtos químicos, principalmente cal, no lodo desaguado gerou uma prática conhecida como estabilização alcalina (EA). O processo de EA tem sido empregada no Estado de Goiás para obtenção de biossólido "Classe B", pelas alternativas já descritas no QUADRO 3. O biossólido gerado é destinado para aplicação em cultivos agrícolas de milho e pastagem. No estado do Paraná a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) também realiza um processo de EA por período de 30 dias de manutenção de pH elevado, que após a comprovação de sua eficiência, esse método foi incluído na Resolução SEMA 21/09, que estabelece condições e padrões ambientais para processos de saneamento, e passou a ser chamado de Estabilização Alcalina Prolongada (EAP). A SANEPAR, segue aplicando lodo de estabilizado alcalina na agricultura desde 2002, onde entre 2007 e 2020 foram aplicadas cerca de 320 mil toneladas de biossólidos (Paraná, 2009; Bittencourt, 2023).

A EAP, realizada pela SANEPAR, tem por princípio a elevação do pH a níveis superiores a 12 com posterior período de cura de 30 dias, através da incorporação de cal virgem ao lodo em proporções que oscilam de 30% a 50% do peso seco do lodo, para garantir que a redução de patógenos atinja seu nível ótimo (Paraná, 2009;

Bittencourt, 2014; Pinto, 2014). Entretanto, essa abordagem enfrenta desafios significativos, como a necessidade de grandes áreas para o processo, a limitação no teor de sólidos do lodo seco (geralmente não superior a 30%) e a incorporação de produtos químicos (como a cal virgem) e o tempo de cura do lodo (de 30 a 45 dias) (Bittencourt, 2014; Andreoli *et al.*, 2022).

Outro enfrentamento para o processo de EAP é que após toda realização deve-se aguardar, no mínimo, mais 30 dias, pós-período de cura, para o recebimento das análises de ovos viáveis de helmintos, período que possibilita o surgimento de outros fatores externos, e afeta o gerenciamento do lodo dentro das Unidades de Gerenciamento de Lodo (UGL) e a tramitação da autorização ambiental (Cerqueira; Bittencourt; Aisse, 2019).

No que diz respeito às estruturas necessárias para facilitar o processo da EAP, essas dependerão da vazão de lodo a ser higienizado e do método de desaguamento empregado, algumas destas estruturas estão apontadas na FIGURA 5. Para sistemas de grande porte que adotam o desaguamento mecânico do lodo, é comum a utilização de silos de estocagem, dosadores de cal, roscas transportadoras para cal e lodo, misturadores de cal e lodo, além de outros equipamentos auxiliares. Por outro lado, em sistemas menores onde o desaguamento ocorre em leitos de secagem, a betoneira com carregador automático emerge como uma alternativa eficaz para a mistura do lodo com a cal, podendo ser adaptada para desagregar o lodo e otimizar o contato com a cal. Em ambas as situações, especialmente no contexto da aplicação agrícola, é fundamental contar com um pátio de higienização específico para o lodo sob o processo de EAP.

A SANEPAR adota a prática de desaguar o lodo de esgoto em leitos de secagem (geralmente para ETEs de pequeno porte) ou em centrífugas (para ETEs de médio e grande porte), seguido pelo processo de estabilização alcalina prolongada (EAP), com reviramento do lodo para manutenção do pH elevado e homogeneização do lodo sob processo de EAP. Cerqueira, Bittencourt e Aisse (2019) propuseram um dimensionamento dos pátios de higienização por EAP e definiram um corte esquemático do monte de lodo, conforme FIGURA 6.

A FIGURA 5 traz as estruturas que usualmente são usados durante o processo de desaguamento do lodo de esgoto para posterior estabilização alcalina de lodo de esgoto.

FIGURA 5 - ESTRUTURAS NECESSÁRIAS PARA O PROCESSO DE EAP

a)

b)

c)

d)

e)

f)

FONTE: O autor (2025)[1]; Rietow (2024)[2] e Notas de aula (2024)[3].

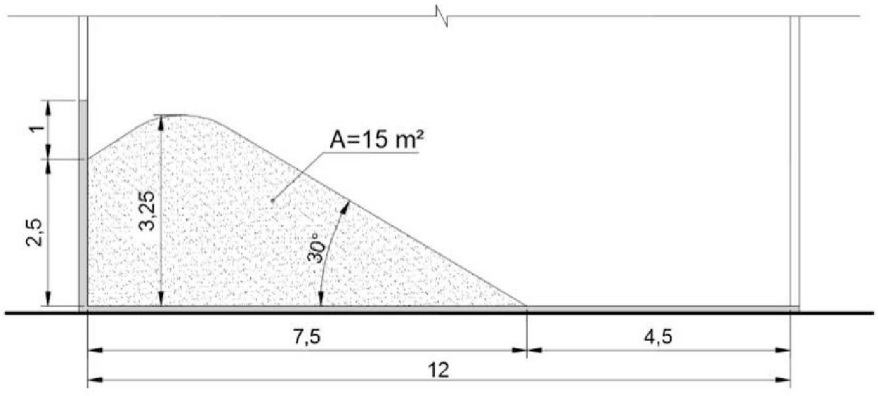
NOTA: a) Centrífuga/desaguamento mecânico[1]; b) Lodo centrifugado disposto em caçamba[1]; c) Leito de secagem com lodo fresco[1]; d) Leito de secagem com lodo seco[1]; e) Silo de cal[2] f) Betoneira utilizada para homogeneização do lodo com cal[2].

A partir de experiências de operação deste processo de higienização em algumas ETE's e UGL no estado do Paraná. Para tanto, foram definidas algumas premissas para o dimensionamento, que são:

a) O lodo é destinado ao pátio com teores de sólidos acima de 20%;
b) Os montes de lodo podem atingir cerca de 3,50 m de altura quando utilizado maquinário;
c) Paredes laterais podem ser utilizadas para otimização do uso dos pátios;
d) Tempo de ciclo dos lotes de lodo são de 12 meses.

Um pátio com largura de 12m, sendo 7,5m destinados à base do monte de lodo e 4,5m para o deslocamento de pessoal e equipamento. Ao multiplicar a área de seção do monte de lodo (15m²) pelo comprimento de 1m do pátio e dividir esse valor resultante pela área de 12m², temos uma relação de 1,25m³ de lodo caleado por m² de pátio. Com essa relação é possível estimar a taxa de aplicação de sólidos por m² considerando a massa específica do lodo caleado de 850kg/m³, o teor de umidade de 50% e uma taxa de aplicação de cal de 50% em relação aos sólidos totais do lodo.

FIGURA 6 - CORTE ESQUEMÁTICO DE MONTE DE LODO DISPOSTO NO PÁTIO PARA PROCESSO DE EAP



FONTE: Cerqueira, Bittencourt e Aisse (2019).

$$Ts = 1{,}25\ \frac{m^3 lodo}{m^2 pátio} \times 0{,}50\ \frac{kgST}{kg\ lodo} \times 850\ \frac{kg\ lodo}{m^3 lodo} = 531\ \frac{kgST}{m^3 pátio}$$

Dado que o lodo em questão contém 50% de cal em relação aos sólidos do lodo, foi calculado que, dos 531 kg de sólidos totais (ST), 354 kg correspondem ao lodo e 177 kg são provenientes da adição de cal. Com o objetivo de estabelecer um parâmetro mais prático para o dimensionamento, optou-se por considerar uma taxa de aplicação de sólidos de 350 kg/m², sem levar em consideração os sólidos provenientes da adição de cal. Considerando-se o tempo de ciclo de 12 meses a taxa mencionada passa a ser de 350 kg ST/m² ano.

Ao formalizar o método proposto de dimensionamento, buscou-se estabelecer uma analogia com a fórmula convencional de dimensionamento de leitos de secagem, como é apresentado a seguir:

$$A = \frac{P\ lodo * Tc}{Tx}$$

Em que:

f) A = área necessária de pátio (m²);
g) P_{lodo} = produção de lodo (kgST/d);
h) T_c = tempo de ciclo (d);
i) T_x = Taxa de aplicação de sólidos (kg ST/m² ano).

3 METODOLOGIA

Para apresentar a área de estudo, os materiais e métodos utilizados que atendam aos objetivos específicos, este capítulo foi seccionado da seguinte maneira:

No primeiro item, 3.1, realizou-se a caracterização da área de estudo descrevendo as operações unitárias que constam na ETE Santa Quitéria e local de realização da estabilização alcalina.

No segundo item, 3.2, os materiais e métodos utilizados para obtenção da avaliação físico-químicos do lodo sob processo de estabilização alcalina em atendimento ao objetivo específicos 1. No terceiro item, 3.3, os materiais métodos utilizados para obtenção da avaliação microbiológica em atendimento ao objetivo específicos 2.

A montagem da metodologia do experimento foi feita com base na literatura pesquisada, conforme consta no QUADRO 9.

Com base em estudos anteriores, os experimentos de avaliação físico-química e microbiológica foram deliberadamente conduzidos sob condições desafiadoras para o processo de estabilização alcalina. Optou-se pela utilização de lodo anaeróbio desaguado por centrífuga, considerado um cenário crítico por dois motivos principais. O primeiro refere-se ao baixo teor de sólidos resultante do desaguamento mecânico, que, em comparação ao lodo proveniente de leito de secagem, exige maior quantidade de cal em relação aos sólidos totais para elevar o pH a 12. O segundo motivo diz respeito ao fato de o lodo anaeróbio apresentar, de forma característica, valores iniciais de pH mais baixos em comparação ao lodo aeróbio, conforme evidenciado na TABELA 4, o que demanda maior capacidade neutralizante dos agentes alcalinizantes. A premissa fundamental deste delineamento experimental é que a comprovação da eficácia do processo sob estas condições adversas permitiriam inferir sua aplicabilidade em cenários operacionais mais favoráveis, conferindo maior robustez e confiabilidade aos resultados obtidos.

3.1 ÁREA DE ESTUDO E CLIMA

3.1.1 Descrição da área de realização do experimento

O estudo foi realizado nos pátios cobertos da ETE Santa Quitéria, indicada na FIGURA 7, localizada na cidade de Curitiba, Paraná (25°27'46,55'' Sul; 49°19'14,94'' Oeste, altitude 892 m). A ETE atende uma população de 250 a 300 mil habitantes, correspondendo a uma vazão máxima de 600L/s. Para fase líquida a ETE conta com: estação elevatória na chegada do efluente; tratamento preliminar composto por gradeamento, desarenador e calha Parshall; tratamento biológico realizado através de 6 reatores anaeróbios do tipo UASB; e pós-tratamento físico-químico realizado por misturador rápido, por floculadores (ambos mecanizados) e flotadores (flotação por ar dissolvido). Na fase sólida a ETE realiza o processo de adensamento do lodo por gravidade e desaguamento mecânico em centrífugas, auxiliadas por polímeros, que desagua o lodo em concentrações próximas de 20%. A ETE conta com pátios cobertos destinados originalmente à estabilização alcalina do lodo, embora essa prática não seja mais realizada nesta ETE.

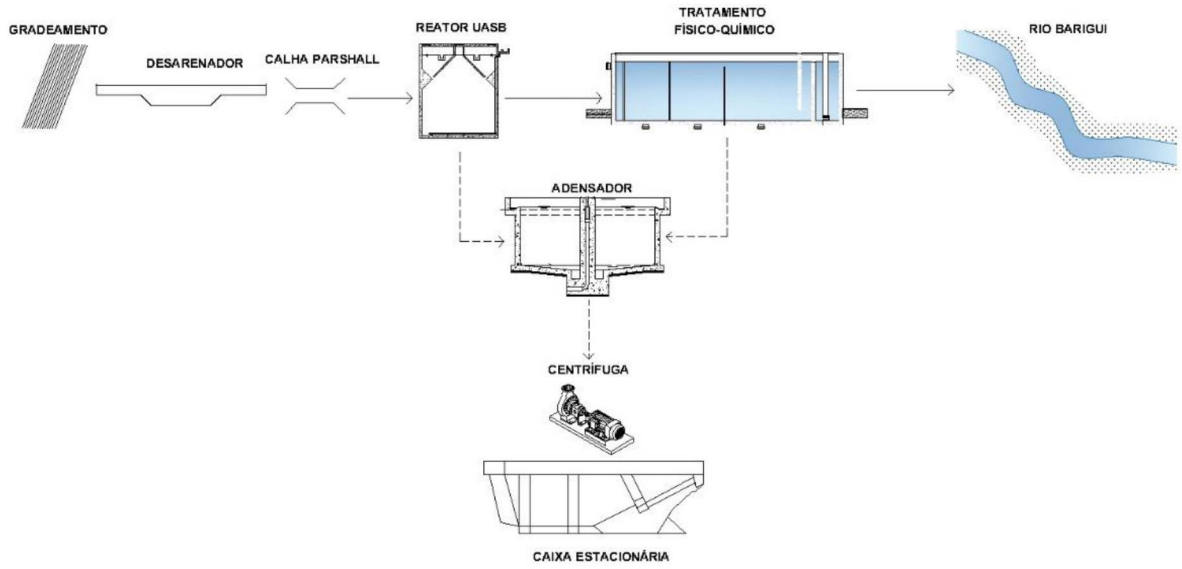
FIGURA 7 - VISTA AÉREA DA ETE SANTA QUITÉRIA

NOTA: a) Reatores UASB's; b) Central de desaguamento; c) Pátio coberto.

FONTE: O autor (2025).

A FIGURA 8 apresenta um fluxograma representativo do sistema de tratamento utilizado na ETE Santa Quitéria para as fases líquidas e sólidas do esgoto doméstico.

FIGURA 8 - FLUXOGRAMA NA ETE SANTA QUITÉRIA



NOTA: O adensador tem sido transformado em homogeneizador de lodo. O destino do lodo na caixa estacionária é uma UGL.

FONTE: O autor (2025).

3.1.2 Condições climatológicas do período de experimento

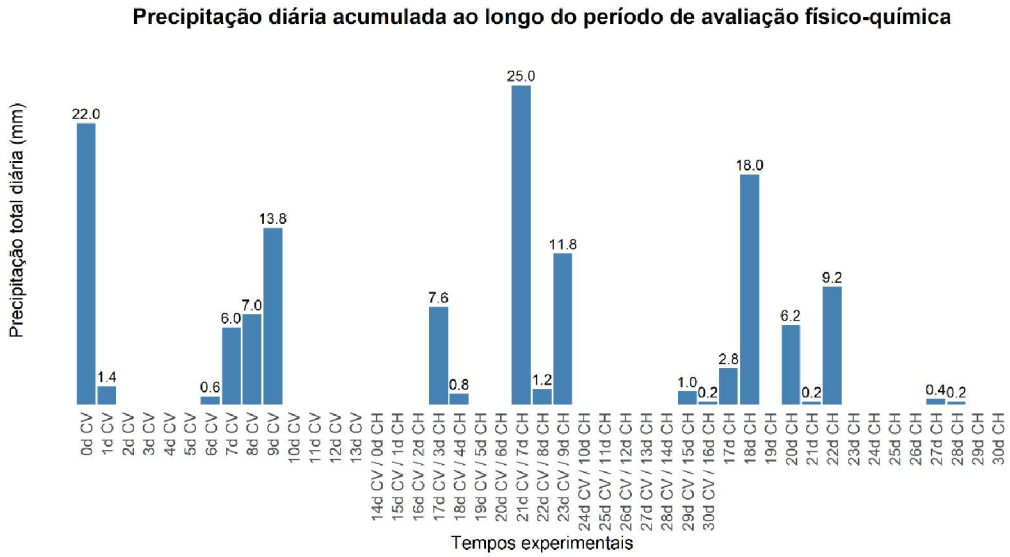
Considerando que as condições climatológicas exercem influência direta tanto sobre os parâmetros físico-químicos, como temperatura e sólidos totais, quanto sobre as condições microbiológicas relacionadas à sobrevivência dos microrganismos, foram monitoradas as variáveis precipitação, temperatura do ar e umidade relativa do ar. Os dados foram obtidos junto à Estação Meteorológica de Curitiba, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Vale ressaltar que todo o experimento foi conduzido dentro do pátio coberto da ETE Santa Quitéria, logo não houve interferência direta das precipitações nas unidades experimentais e parâmetros analisados. O experimento para avaliação físico-química teve duração total de 43 dias, ocorrendo entre 2 de outubro e 15 de novembro de 2024. A estabilização alcalina com cal virgem foi realizada entre 2 de outubro e 1 de novembro, enquanto a estabilização com cal hidratada ocorreu entre

16 de outubro e 15 de novembro, havendo, portanto, um período de realização simultânea dos experimentos.

A FIGURA 9 apresenta a incidência de precipitação durante o período experimental da avaliação físico-química, enquanto a TABELA 5 apresenta os valores médios, máximos e mínimos diários de temperatura registrados durante os dias de amostragem do experimento para avaliação físico-química no pátio coberto da ETE.

FIGURA 9 – PRECIPITAÇÃO REGISTRADA DURANTE AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA



LEGENDA: d – dia; CV – cal virgem e; CH – cal hidratada

FONTE: INMET (2025)

TABELA 5 - REGISTRO DE TEMPERATURA DO AR DURANTE AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

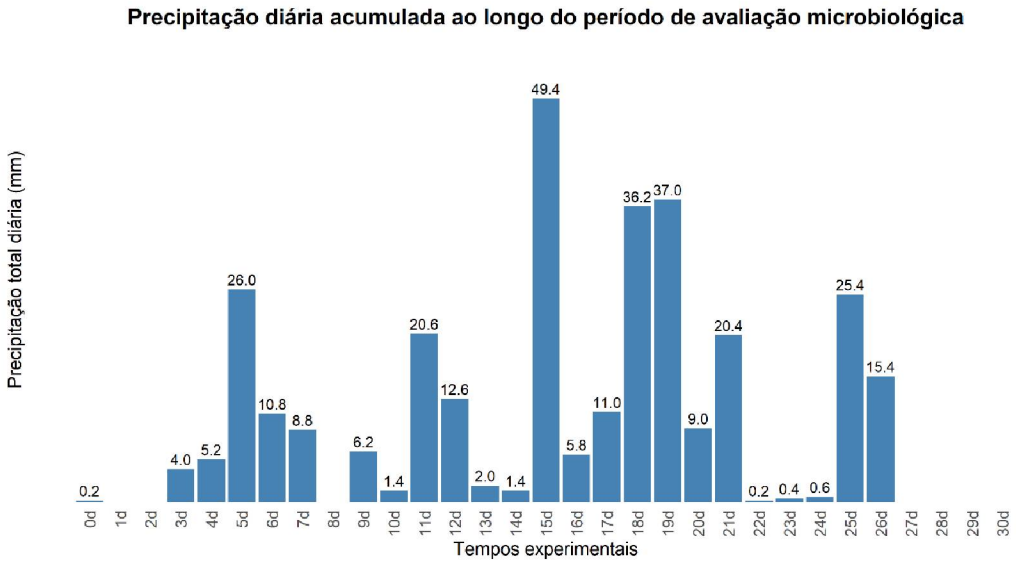
Dias	Temperatura média		Temperatura máxima		Temperatura mínima	
	CV	CH	CV	CH	CV	CH
0	21,0°C	19,7°C	27,1°C	27,7°C	17,6°C	15,1°C
1	15,0°C	20,5°C	17,8°C	28,9°C	11,8°C	16,1°C
2	12,8°C	20,2°C	15,5°C	27,3°C	10,8°C	17,0°C
9	18,2°C	22,8°C	19,9°C	29,1°C	16,9°C	18,8°C
12	15,5°C	18,2°C	17,5°C	25,1°C	13,7°C	14,1°C
15	20,5°C	18,5°C	28,9°C	23,4°C	16,1°C	15,7°C
20	22,8°C	21,0°C	30,2°C	26,0°C	17,7°C	18,8°C
25	16,3°C	17,9°C	19,3°C	23,3°C	14,1°C	14,4°C
30	18,2°C	18,3°C	23,1°C	23,2°C	13,7°C	15,0°C

LEGENDA: CV – cal virgem; CH – cal hidratada; °C – graus Celsius e; d – dia.

FONTE: INMET (2025).

O experimento para avaliação microbiológica teve duração de 30 dias, sendo conduzido de forma simultânea com a utilização de cal virgem e cal hidratada, entre 13 de janeiro e 12 de fevereiro de 2025. A FIGURA 10 apresenta a incidência de precipitação durante o período experimental da avaliação microbiológica, enquanto a TABELA 6 apresenta os valores médios, máximos e mínimos diários de temperatura registrados durante os dias de amostragem do experimento para avaliação microbiológica.

FIGURA 10 - PRECIPITAÇÃO REGISTRADA DURANTE AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA



FONTE: INMET (2025).

TABELA 6 - REGISTRO DE TEMPERATURA DO AR DURANTE AVALIAÇÃO MICROBIOLOGICA

Dias	Temperatura média	Temperatura máxima	Temperatura mínima
0	18,2°C	24,0°C	12,9°C
1	19,3°C	25,4°C	14,6°C
2	18,9°C	23,9°C	13,2°C
9	23,1°C	28,4°C	20,0°C
12	23,2°C	29,7°C	19,6°C
15	21,4°C	26,5°C	19,3°C
20	21,5°C	26,2°C	18,6°C
25	21,5°C	26,9°C	19,0°C
30	25,8°C	31,6°C	20,6°C

FONTE: INMET (2025).

3.2 AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO EXPERIMENTO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA

Para a avaliação físico-química, o experimento de estabilização alcalina de lodo de esgoto foi conduzido utilizando dois agentes alcalinizantes: cal virgem e cal hidratada. No entanto, devido às limitações de espaço nos pátios cobertos da ETE Santa Quitéria, à disponibilidade do lodo de esgoto e à demanda de esforço laboral, não foi possível realizar ambas as experimentações simultaneamente. Dessa forma, optou-se por conduzi-las em momentos distintos, separando em duas fases. A FIGURA 11 mostra as cales que foram utilizadas e o espaço utilizado para a realização do experimento de estabilização alcalina.

FIGURA 11 – CALES UTILIZADAS PARA O EXPERIMENTO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA E O PÁTIO COBERTO

a) b)

c)

NOTA: a) cal virgem utilizada no experimento; b) cal hidratada utilizada no experimento; c) espaço para realização do experimento junto ao pátio coberto.

FONTE: O autor (2025).

Inicialmente, para a primeira fase (1ª fase), o experimento foi realizado com a adição de cal virgem utilizando um lote específico de lodo coletado na estação de tratamento. Após o monitoramento dessa etapa por 30 dias, deu-se início à segunda fase (2ª fase), na qual foi utilizada a cal hidratada para a estabilização alcalina. Para essa segunda fase, foi coletado um novo lote de lodo. Os lotes de lodo anaeróbio utilizados no experimento foram produzidos no próprio dia da realização de cada experimento, fazendo com que a caracterização do lodo de esgoto fosse distinta para cada fase. Dessa forma, a primeira fase do experimento foi realizada com cal virgem e a segunda fase com cal hidratada.

3.2.1 Lodo utilizado no experimento para avaliação físico-química

Para avaliação físico-química do experimento de estabilização alcalina, foi utilizado exclusivamente lodo anaeróbio proveniente de reatores UASB, adensado por gravidade em uma operação unitária separada e posteriormente desaguado por centrifugação na ETE Santa Quitéria. Esse procedimento garantiu que o lodo proveniente do pós-tratamento físico-químico da ETE Santa Quitéria não fosse incorporado às unidades experimentais, assegurando que o experimento fosse conduzido exclusivamente com lodo anaeróbio desaguado em centrífuga.

O lodo de esgoto foi coletado da unidade de desaguamento da ETE Santa Quitéria e direcionado para uma caixa estacionária, conforme mostra a FIGURA 12. A partir de então, o lodo era transportado com auxílio de um caminhão até o pátio coberto para que fosse possível iniciar o experimento de estabilização alcalina.

O lodo proveniente dos seis reatores UASB da ETE Santa Quitéria passam por um homogeneizador antes do desaguamento, visando otimizar a operação das centrífugas, mesmo que os reatores já forneçam um lodo adensado. Essa etapa é essencial para que a centrífuga opere de forma eficiente com lodo que tenha concentração homogênea de sólidos. Como os reatores UASB podem gerar lodo em concentrações variáveis, o homogeneizador assegura a uniformidade necessária para o adequado desempenho do processo de desaguamento. Ao final dessa etapa, o lodo apresenta um teor de sólidos entre 3% e 5%, garantindo as condições ideais para a operação da centrífuga.

FIGURA 12 – UNIDADE DE DESAGUAMENTO DA ETE SANTA QUITÉRIA

FONTE: O Autor (2025).

O lodo proveniente dos seis reatores UASB da ETE Santa Quitéria passam por um homogeneizador antes do desaguamento, visando otimizar a operação das centrífugas, mesmo que os reatores já forneçam um lodo adensado. Essa etapa é essencial para que a centrífuga opere de forma eficiente com lodo que tenha concentração homogênea de sólidos. Como os reatores UASB podem gerar lodo em concentrações variáveis, o homogeneizador assegura a uniformidade necessária para o adequado desempenho do processo de desaguamento. Ao final dessa etapa, o lodo apresenta um teor de sólidos entre 3% e 5%, garantindo as condições ideais para a operação da centrífuga.

Logo, após o processo de desaguamento, o lodo que entra na centrifuga com baixas porcentagens de sólidos totais sai da unidade com aproximadamente 20% de ST. As características do lodo coletado para a avaliação físico-química, tanto na estabilização alcalina via cal virgem, quanto na estabilização alcalina via cal hidratada estão apresentadas na TABELA 7.

TABELA 7 - CARACTERÍSTICAS DO LODO UTILIZADO NO EXPERIMENTO PARA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

Parâmetro	FASES			
	1ª fase (cal virgem)		2ª fase (cal hidratada)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
pH (em água 1:2,5)	7,87	0,17	7,54	0,27
Temperatura (°C)	27,60	-	23,77	-
Sólidos Totais (%, p/p)	22,08	0,28	25,88	0,38
Sólidos Voláteis (%)	67,27	1,43	67,29	0,36
Sólidos Fixos (%)	32,73	1,43	32,71	0,36

NOTA: Os valores apresentados correspondem à média aritmética e ao desvio padrão de três repetições independentes (n = 3), obtidos aproximadamente 1 hora após a mistura do lodo com a cal.

Fonte: O autor (2025).

3.2.2 Definição da massa de lodo e das concentrações de cales nas unidades experimentais para avaliação físico-química

A definição da massa de lodo utilizada no experimento de estabilização alcalina, dos tipos de cales empregadas e das proporções aplicadas, foi baseada na literatura e em estudos prévios sobre estabilização alcalina de lodo de esgoto. O QUADRO 9, que encontra-se ao final deste capítulo, apresenta um panorama desses estudos, incluindo informações sobre o tipo de lodo e o método de desaguamento empregado, o teor de ST (%), o número de réplicas adotado, a configuração do reator para a estabilização alcalina e os parâmetros analisados em cada pesquisa.

As unidades experimentais foram conduzidas em triplicata, sendo que cada unidade experimental continha 20kg de lodo, ao qual adicionada a quantidade correspondente de cal, conforme a proporção estabelecida para cada tratamento. Essa escala permitiu a realização de todas as análises físico-químicas previstas, além de possibilitar a avaliação do comportamento da estabilização alcalina em uma dimensão superior à escala laboratorial.

Para a avaliação físico-química, as proporções de cal foram definidas com o objetivo de garantir que a mistura atingisse um pH superior a 12 e se mantivesse nesse patamar por aproximadamente 30 dias. Esse critério permitiu avaliar a eficiência da manutenção do pH elevado sob diferentes dosagens de cal.

Dessa forma, foram estabelecidas quatro proporções distintas de cal, além da definição do número de réplicas por tratamento, da massa de lodo por unidade

experimental e da massa total de lodo utilizada para cada proporção de cal, conforme apresentado na TABELA 8. Como o experimento foi realizado separadamente para cal virgem e cal hidratada, a configuração descrita na TABELA 8 foi replicada para ambas as fases experimentais da avaliação físico-química do lodo de esgoto sob processo de estabilização alcalina.

A FIGURA 13 apresenta como as unidades experimentais foram dispostas para realização do experimento de estabilização alcalina.

FIGURA 13 - UNIDADES EXPERIMENTAIS DA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

FONTE: O Autor (2025).

TABELA 8 – CONFIGURAÇÃO DAS UNIDADES EXPERIMENTAIS E PROPORÇÕES DE CAL UTILIZADAS NO EXPERIMENTO PARA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

Proporções de cal	N° de réplicas	Massa de lodo por réplica	Total de massa de lodo utilizado
0%	3	20 kg	60 kg
30%	3	20 kg	60 kg
40%	3	20 kg	60 kg
50%	3	20 kg	60 kg

NOTA: As informações da tabela são referentes a apenas uma fase. As proporções de cal são em relação ao teor de ST (%) do lodo.

FONTE: O autor (2025).

Como o experimento foi conduzido com dois tipos de cal: cal virgem e cal hidratada, as reações químicas podem influenciar diretamente o processo de estabilização alcalina. A cal virgem reage com a água presente no lodo, promovendo uma reação exotérmica e liberação de calor durante sua hidratação, além de contribuir para a elevação do pH da mistura devido à liberação de íons hidroxila (OH^-). Já a cal hidratada, não gera calor, mas ainda assim promove a alcalinização do lodo por meio da liberação direta de íons hidroxila (OH^-). A composição química de cada tipo de cal está apresentada na TABELA 9, onde são detalhados os teores dos principais compostos que estão presente na cal virgem e na cal hidratada.

TABELA 9 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS CALES UTILIZADAS NO EXPERIMENTO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA PARA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

Componente	Cal virgem (%)	Cal hidratada (%)
Óxido de cálcio (CaO)	50,10	
Óxido de cálcio + Óxido de magnésio (CaO + MgO)	86,17	
Hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$)		91,98
Carbonato de cálcio ($CaCO_3$)		4,98

NOTA: Os valores apresentam a composição percentual em relação à massa total da cal analisada. Os valores estão descritos conforme o laudo apresentado para cada cal.

FONTE: O Autor (2025).

O cálculo da quantidade de cal a ser adicionada ao experimento foi baseado na média dos teores de sólidos totais determinados para cada fase do estudo: fase 1 (cal virgem) e fase 2 (cal hidratada). Esses valores de ST(%) já encontram-se apresentados na TABELA 7. Além disso, considerou-se a massa de lodo por unidade experimental, fixada em 20kg. Dessa maneira, as proporções de cal definidas em percentual foram convertidas para a massa de cal equivalente ao teor de sólidos totais (ST). Através da EQUAÇÃO 1 é possível encontrar a quantidade de massa de cal referente as proporções utilizadas no experimento para avaliação físico-química, levando em consideração a massa de lodo utilizada de 20 kg e o teor de sólidos encontrado para cada fase. Os valores de massa de cal obtidos estão apresentados na TABELA 10.

$$Quantidade\ de\ cal = massa\ do\ lodo \times \frac{\%ST}{100} \times \frac{proporção\ de\ cal\ em\ \%}{100} \quad (1)$$

TABELA 10 - MASSA DE CAL UTILIZADA PARA CADA PROPORÇÃO NO EXPERIMENTO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA PARA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

Proporção de cal	1ª fase (cal virgem)		2ª fase (cal hidratada)	
	Teor de sólidos	Massa de cal (kg)	Teor de sólidos	Massa de cal (kg)
0%	22,08% (vide TABELA 7)	0	25,88% (vide TABELA 7)	0
30%		1,32 kg		1,55 kg
40%		1,77 kg		2,07 kg
50%		2,21 kg		2,59 kg

NOTA: massa de lodo utilizada foi de 20kg; valor de massa de cal foi obtido conforme EQUAÇÃO (1).

Fonte: O autor (2025).

3.2.3 Procedimentos iniciais e instalação experimental para avaliação físico-química

A mistura do lodo com a cal foi realizada por meio de agitação mecânica em uma betoneira, volume de 400 L à uma rotação do tambor de 30 rpm – 60 Hz, com tempo de mistura aproximado de 5 minutos. A betoneira e a balança foram posicionadas próximas à caixa estacionária contendo o lodo, de modo a facilitar o procedimento de pesagem e incorporação da cal. Antes da adição da cal, a massa de lodo foi devidamente homogeneizada para garantir uniformidade em todas as unidades experimentais.

A preparação das misturas lodo-cal seguiu uma ordem crescente de concentração de cal, iniciando pela menor proporção (30%), seguida por 40% e, por fim, 50% de cal. Para cada ciclo de preparação, inicialmente, eram pesados 20 kg de lodo em balança mecânica industrial, que eram então transferidos para a betoneira. Durante a agitação, a massa de cal correspondente à proporção definida, previamente pesada em balança eletrônica para garantir maior precisão na dosagem, era gradualmente incorporada, garantindo sua distribuição homogênea na matriz do lodo. Esse processo era repetido até que a betoneira contivesse 60 kg de lodo misturado com a cal, o suficiente para preencher três unidades experimentais, referente às tréplicas de cada tratamento.

A FIGURA 14 mostra a betoneira e a balança mecânica, com capacidade de 300 kg e precisão de 100 g, utilizadas para a realização do experimento para avaliação físico-química.

FIGURA 14 - BETONEIRA E BALANÇA UTILIZADAS PARA REALIZAR A MISTURA E PESAGEM DO LODO-CAL

a)

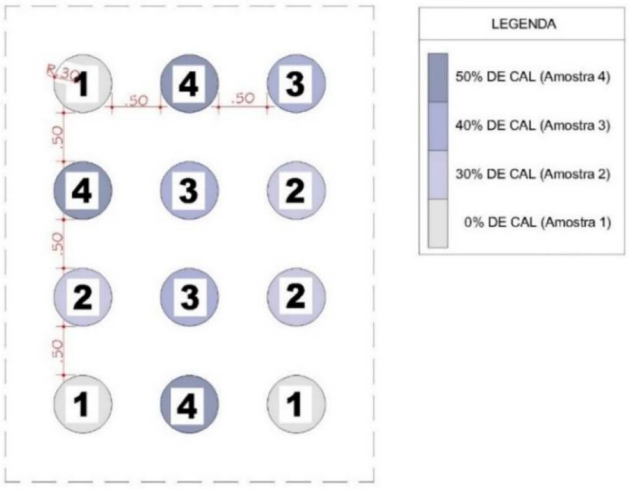
b)

NOTA: a) Betoneira utilizada para mistura lodo-cal; b) Balança utilizada para pesagem da mistura.

FONTE: O Autor (2025).

Após a homogeneização completa, a mistura era retirada da betoneira e distribuída em três bandejas plásticas retangulares de 20 L, cada uma contendo aproximadamente 20 kg da mistura lodo-cal. As bandejas eram, então, alocadas em suas posições experimentais de maneira aleatória, conforme ilustra a FIGURA 15. Dessa maneira, reduzindo possíveis vieses associados à disposição espacial das amostras no ambiente experimental.

FIGURA 15 - ARRANJO DAS AMOSTRAS DO LODO NO PÁTIOS PARA AS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS



FONTE: O Autor (2025).

Amostras foram coletadas imediatamente após a mistura lodo-cal e início do processo de estabilização alcalina para análises de pH e de sólidos totais, a afim de caracterizar os parâmetros físico-químicos iniciais das misturas.

Para garantir a integridade dos tratamentos e evitar contaminação entre diferentes concentrações de cal, a betoneira era devidamente limpa antes da mudança para uma nova proporção. No caso da cal virgem, foi observada uma elevação da temperatura durante a mistura, devido à reação exotérmica de hidratação do óxido de cálcio e óxido de magnésio. Já na aplicação da cal hidratada, a incorporação ocorreu sem variação térmica observável. Outra observação foi a presença de odor forte referente a volatilização da amônia durante o processo de mistura.

Após a montagem de todas as unidades experimentais, os termopares foram inseridos na massa de lodo para monitoramento da temperatura ao longo do experimento. A aquisição dos dados foi realizado por meio do *FieldLogger* 512k - Interface RS485, permitindo o registro contínuo das variações térmicas em cada tratamento.

As unidades experimentais foram mantidas no pátio coberto da ETE Santa Quitéria, utilizado anteriormente como pátio da UGL, garantindo proteção contra intempéries enquanto possibilitava a interação do lodo sob estabilização alcalina com o ambiente sem interferências externas significativas. Cada unidade foi devidamente identificada de acordo com o tipo de cal utilizado, a proporção aplicada e a réplica correspondente, assegurando um acompanhamento preciso ao lodo de todo o período experimental.

A FIGURA 16 apresenta a configuração das unidades experimentais referente à 1ª fase do experimento para avaliação físico-química. A FIGURA 17 mostra a disposição das unidades experimentais no pátio durante a 2ª fase do experimento, com as unidades da 1ª fase alinhadas lateralmente. Além disso, na FIGURA 17 observa-se a variação nos padrões de cores nas unidades experimentais em função do tempo de exposição do lodo sob o processo de estabilização alcalina: as tonalidades mais claras correspondem às unidades mais antigas, enquanto as mais escuras indicam as unidades mais recentes.

FIGURA 16 – DISPOSIÇÃO DAS UNIDADES EXPERIMENTAIS NA FASE 1 PARA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E INSERÇÃO DOS TERMOPARES NAS PILHAS DE LODO NAS UNIDADES

FONTE: O Autor (2025).

FIGURA 17 - DISPOSIÇÃO DAS UNIDADES EXPERIMENTAIS REFERENTES À FASE 2 PARA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

NOTA: A variação do padrão de cores é referente ao tempo de cura e exposição do lodo sob estabilização alcalina à atmosfera.

FONTE: O Autor (2025).

Desta maneira, houve a montagem de 24 unidades de estabilização alcalina do lodo de esgoto para avaliação físico-química. Sendo 12 tratamentos para uso de cal vigem e 12 tratamentos uso de cal hidratada, cada unidade experimental contendo

20 kg de lodo mais o respectivo acréscimo da quantidade de cal, conforme a proporção definida para cada unidade experimental.

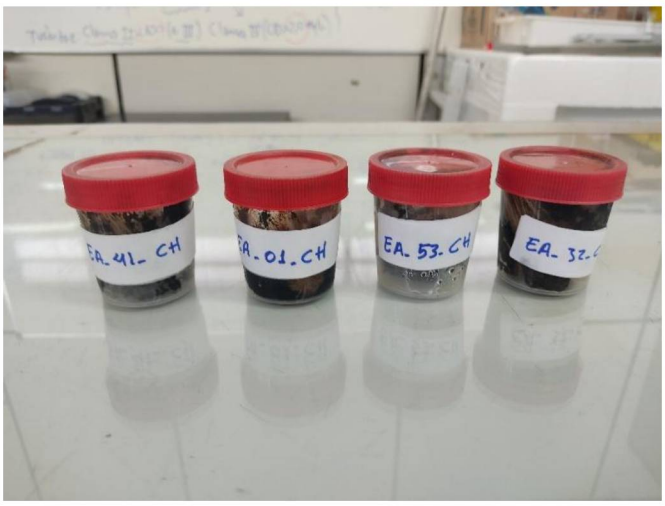
3.2.4 Método da amostragem para avaliação físico-química

As coletas foram realizadas pelo turno da manhã no pátio coberto da ETE Santa Quitéria, onde o experimento foi conduzido, em intervalos pré-determinados, permitindo o acompanhamento das variações físico-químicas ao longo de todo o período experimental.

Para a amostragem foram utilizadas espátulas que permitiam a retirada do lodo da camada interna de cada unidade experimental. As espátulas utilizadas na amostragem eram higienizadas entre uma amostra e outra, utilizando água de diluição e papel toalha, a afim de evitar contaminação cruzada entre as unidades experimentais. As amostras de lodo foram coletadas diretamente das unidades experimentais em diferentes pontos do monte de lodo ao longo do seu perfil vertical, formando uma amostra composta e homogeneizada.

Cada amostra foi devidamente identificada com informações sobre o tratamento correspondente, tempo de amostragem e número da réplica, conforme mostra a FIGURA 18. Além disso, após a utilização das amostras para as análises físico-químicas, o lodo remanescente foi armazenado em geladeira para eventuais análises complementares.

FIGURA 18 – ACONDICIONAMENTO E IDENTIFICAÇÕES DAS AMOSTRAS PARA REALIZAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSCO-QUÍMICAS



FONTE: O Autor (2025).

O acondicionamento foi feito em coletores de plástico estéreis e mantido sob refrigeração em caixas térmicas com gelo, buscando manter a temperatura em torno de 4°C, até a chegada no Laboratório de Engenharia Ambiental Francisco Borsari Netto (LABEAM), na Universidade Federal do Paraná, campus Centro Politécnico, onde foram realizados todas as análises físico-químicas de pH, ST, SFT e SVT.

3.2.5 Frequência das coletas e parâmetros analisados para avaliação físico-química

Para as análises físico-químicas, as coletas foram realizadas nos tempos experimentais apresentados no QUADRO 4. Esses intervalos foram escolhidos com base em estudos prévios e recomendações normativas, de modo a avaliar tanto a resposta inicial da estabilização alcalina, quanto a sua permanência de pH elevado ao longo do tempo e comportamento dos sólidos totais e temperatura para ambos os usos de cal.

O QUADRO 4 apresenta os dias de monitoramento dos parâmetros em relação ao início do experimento.

QUADRO 4 - FREQUENCIA DE MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS ANALISADOS PARA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

Parâmetros analisados	Dias de coleta ou monitoramento
pH	0 d; 1d; 2d; 3d; 9d; 12d; 15d; 20d; 25d e; 30d.
Sólidos Totais	0 d; 1d; 2d; 3d; 9d; 12d; 15d; 20d; 25d e; 30d.
Temperatura	0h à 12h (monitoramento a cada 2 minutos)

NOTA: O monitoramento de temperatura foi realizado durante 3 dias, porém apenas as horas iniciais do experimento foram relatadas nos resultados. A medição de temperatura foi feita a cada 2 minutos através do FieldLogger.

LEGENDA: d – dia; h – horas.

FONTE: O Autor (2025).

As análises de pH e sólidos totais foram realizadas abrangendo um período total de 30 dias, enquanto o monitoramento da temperatura foi realizado nas 12 horas iniciais. O monitoramento da temperatura estava previsto para 3 dias, porém após as horas iniciais do experimento verificou-se, através dos dados obtidos pelo *FieldLogger*, que a temperatura de todos os tratamentos se estabilizaram atingindo valores próximos à temperatura ambiente do experimento. Os dados obtidos pelo

FieldLogger foram extraídos através do software "Configurador do FieldLogger" versão 1.7.2.01. Com isso, considerou-se apenas os dados referente às 12 horas iniciais do tratamento para ambas as fases.

O pH foi medido em solução aquosa de 25mL de água de diluição combinado a 10g de lodo (1:2,5; lodo:água diluição), a amostra foi agitada por cerca de 3 minutos até se tornar homogênea e deixada em repouso por 1 hora, para então ser feita a leitura, após uma breve agitação, com potenciômetro com eletrodo de vidro.

A porcentagem de sólidos totais foi determinada por secagem em estufa da amostra de lodo a 105°C, em estufa, por 20 horas.

Para determinar a temperatura foi colocado sensores de temperatura do tipo termopar básico T na massa do monte de lodo. Estes sensores foram acoplados a um *FieldLogger* 512k, cujo foi configurado para registrar os valores de temperatura em °C em intervalos de 2 minutos de maneira contínua.

O QUADRO 5 apresenta os métodos e equipamentos utilizados para cada parâmetro físico-químico analisado.

QUADRO 5 – MÉTODOS, EQUIPAMENTOS E FREQUENCIA DE MONITORAMENTO PARA O EXPERIMENTO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA PARA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

Parâmetro	Método	Equipamento
pH	(EMBRAPA, 2017)	pHmetro
Sólidos totais (ST)	Gravimétrico (APHA, 2017)	Estufa
Temperatura	Medição direta	*FieldLogger* – termopar tipo T

FONTE: O autor (2025).

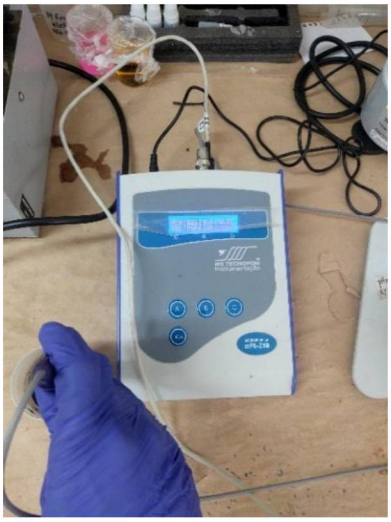
A FIGURA 19 apresenta algumas etapas de procedimentos para realização e obtenção dos dados referentes ao pH e ao sólidos totais das amostras de lodo sob estabilização alcalina para avaliação físico-química.

Para a realização da avaliação físico-química, ao todo, foram analisadas 240 amostras referente a todos os 8 tratamentos, e suas réplicas, em 20 coletas. A TABELA 11 apresenta um panorama dos números de amostras analisadas durante toda a avaliação físico-química do lodo de esgoto sob processo de estabilização alcalina.

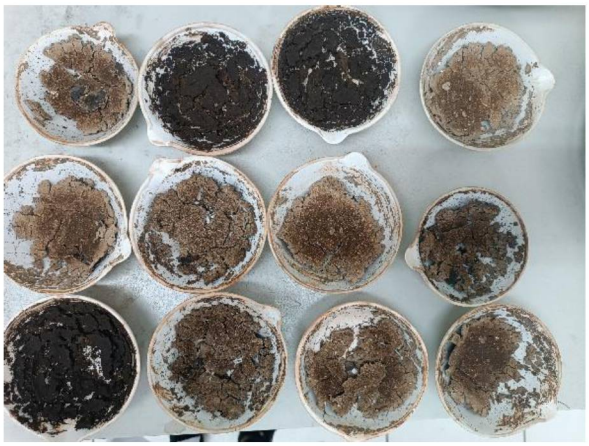
FIGURA 19 – ACONDICIONAMENTO, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS UTILIZADOS PARA ANÁLISES DA AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

a)

b)



c)



d)

e)

f)

NOTA: a) repouso das amostras para medição de pH; b) medição das amostras de pH; c) amostras após processo de secagem em estufa; d) estufa utilizada para realização das análises de sólidos totais; e) *Fieldlogger* utilizado para aquisição de dados de temperatura; f) termopares tipo T usados para capturar as informações de temperatura e transferir para o *Fieldlogger*.

FONTE: O autor (2025).

TABELA 11 - NÚMEROS DE AMOSTRAS UTILIZADAS PARA REALIZAÇÃO DAS DUAS FASES DO EXPERIMENTO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA PARA AVALIAÇÃO DE pH E ST

Tratamento	N° de amostra por coleta	Quantidade de coletas realizadas	Total de amostras
1ª fase (cal virgem)			
Controle	3	10	30
30% de cal			30
40% de cal			30
50% de cal			30
2ª fase (cal hidratada)			
Controle	3	10	30
30% de cal			30
40% de cal			30
50% de cal			30
TOTAL	6	20	240

FONTE: O Autor (2025).

Com essa metodologia, foi possível monitorar a evolução dos parâmetros físico-químicos ao longo do período experimental, fornecendo dados para a avaliação físico-química do lodo, como a manutenção do pH sob diferentes concentrações de cal, distribuição dos sólidos totais ao decorrer do processo de estabilização alcalina e comportamento da temperatura durante o processo de hidratação da cal.

3.3 AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA DO EXPERIMENTO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA

Diferentemente da avaliação físico-química, a avaliação microbiológica do experimento de estabilização alcalina do lodo de esgoto utilizou apenas a proporção de 30% de cal em relação ao ST do lodo, considerada a mais eficiente para ambos os tipos de cales. Esta eficiência foi determinada pela capacidade de manter o pH acima de 12 durante todo o período experimental de 30 dias, utilizando a menor quantidade de agente alcalinizante. Embora todas as proporções testadas na etapa anterior (30%, 40% e 50%) tenham atingido e mantido o pH desejado, a proporção de 30% foi selecionada por representar o menor acréscimo necessário de cal, otimizando o processo.

Foram utilizadas unidades experimentais contendo 20 kg de lodo anaeróbio desaguado em centrífuga, acondicionadas em bandejas plásticas de 20 L, sem réplicas de tratamento, com cal virgem e cal hidratada como agentes alcalinizantes. A avaliação microbiológica foi realizada após a conclusão e análise dos dados da avaliação físico-química, permitindo a aplicação dos conhecimentos adquiridos na primeira etapa.

Foi realizada a inoculação de *Salmonella spp*. e bacteriófagos nas unidades experimentais. A inoculação de *Salmonella spp*. foi adotada para garantir maior representatividade do patógeno, haja visto que sua ocorrência no lodo de esgoto pode variar significativamente. Já a inoculação de bacteriófagos foi utilizada como modelo para a caracterização da redução viral, considerando sua estabilidade e representatividade na avaliação da inativação de vírus durante o tratamento alcalino.

Outras diferenças metodológicas incluíram a não utilização de réplicas entre as unidades experimentais e a realização simultânea da estabilização alcalina com ambos os agentes alcalinizantes. Essa configuração foi adotada devido à redução no número total de unidades experimentais, já que foi utilizada apenas uma proporção de cal para cada tipo de agente alcalinizante, sem replicação. A decisão por esse formato foi motivada por restrições financeiras e pela viabilidade temporal e laboratorial, considerando os desafios operacionais da análise microbiológica e a necessidade de otimizar os recursos disponíveis.

3.3.1 Lodo utilizado no experimento para avaliação microbiológica

O lodo utilizado na avaliação microbiológica foi proveniente da mesma fonte utilizada na etapa de avaliação físico-química. Assim, foi empregado lodo anaeróbio desaguado em centrífuga, coletado na ETE Santa Quitéria, onde o experimento foi conduzido.

A coleta do lodo foi realizada seguindo o mesmo procedimento adotado na avaliação físico-química. No entanto, em vez de ser disposto na caixa estacionária ao lado do pátio coberto, o lodo foi alocado diretamente no chão, conforme ilustrado na FIGURA 20. O preparo do lodo e inoculação para a avaliação microbiológica ocorreram no mesmo dia da realização do experimento, garantindo a preservação das características microbiológicas e evitando possíveis alterações que poderiam comprometer a análise.

FIGURA 20 – LOTE DE LODO, BALANÇA E BETONEIRA UTILIZADAS PARA REALIZAÇÃO DA AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA

FONTE: O Autor (2025).

A escolha de um novo lote de lodo para a avaliação microbiológica foi devido à necessidade de representatividade dos microrganismos presentes no material e à impossibilidade de armazenamento prolongado do lodo utilizado na avaliação físico-química sem que ocorressem alterações significativas nas características e na viabilidade microbiana do lodo. Dessa forma, os resultados obtidos refletem com maior precisão a eficiência da estabilização alcalina na redução da carga microbiológica do lodo de esgoto.

As característica do lodo coletado para a avaliação microbiológica estão apresentadas na TABELA 12.

TABELA 12 - CARACTERÍSTICAS DO LODO UTILIZADO NO EXPERIMENTO PARA AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA

Parâmetros do lodo utilizado para avaliação microbiológica	
Potencial Hidrogeniônico	7,64
Temperatura	24,91°C
Nitrogênio Amoniacal	≈ 1610 mgNH_3-N/kg.ST
Ovos viáveis de helmintos (*Ascaris*)	< 0,1 ovos/g.ST
Sólidos Totais	22,01%
Sólidos Voláteis	61,36%
Sólidos Fixos	38,64%

FONTE: O autor (2025).

3.3.2 Inoculação de salmonela e bacteriófagos no lodo utilizado no experimento

Neste experimento, optou-se pela inoculação de *Salmonella* spp. e bacteriófagos diretamente no lodo de esgoto, antes da adição dos agentes alcalinizantes, com o objetivo de garantir a presença padronizada e controlada desses microrganismos ao logo do período experimental.

A inoculação de *Salmonella* spp. foi necessária em função da sua ocorrência variável no lodo de esgoto, que nem sempre apresenta concentrações detectáveis ou quantificáveis, especialmente em sistema de tratamento de esgoto mais eficientes. A padronização da presença da bactéria permitiu avaliar de forma mais precisa seu comportamento e inativação ao longo do processo de estabilização alcalina, tanto com uso de cal virgem quanto com uso de cal hidratada.

No caso dos bacteriófagos, sua inoculação teve como finalidade simular o comportamento de vírus entéricos durante a estabilização alcalina. Embora os bacteriófagos não infectem células animais, são amplamente utilizados como modelos virais devido à sua metodologia de detecção mais simples e à facilidade de cultivo em laboratório, quando comparados aos vírus patogênicos de origem humana ou animal.

Logo, os bacteriófagos representam uma alternativa segura e tecnicamente viável para a simulação do decaimento de vírus ao longo do processo de estabilização alcalina, tanto com uso de cal virgem quanto com uso de cal hidratada. Haja visto que, o uso direto de vírus entéricos é limitado por sua dependência de cultivo em células animais, bem como pelas barreiras técnicas e de biossegurança envolvidas em sua manipulação e propagação em laboratório.

Por outro lado, não foi realizada inoculação de coliformes termotolerantes, pois esses microrganismos encontram-se naturalmente presentes em elevadas concentrações no lodo de esgoto de origem predominantemente doméstica, como é o caso da ETE Santa Quitéria. Essa característica garantiu a representatividade do grupo, dispensando a necessidade de inoculação.

Para inoculação, foram utilizados os microrganismos modelos: Salmonela entérica sorotipo *Typhimurium* (cepa WG49, NCTC 12484) e colífago somático ΦX-174. No Laboratório RReSSa, no Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária da UFSC (Florianópolis) foi produzido o inóculo de ΦX-174. A Salmonela foi

preparada no Laboratório LABEAM, do Departamento de Hidráulica e Saneamento, da UFPR (Curitiba).

O inóculo de *Salmonella entérica* WG49 (NCT 12484) foi obtido a partir de uma alíquota de 2mL de cultura congelada, adicionada a 50 mL de meio líquido TYGB (*Tryptone-Yeast extract-Glucose Both*) e incubada a 37°C ± 2°C, com agitação a $40s^{-1}$,*overnight*, por aproximadamente 18 horas. Doze horas após o início do cultivo, procedeu-se a uma nova adição de 50 mL de meio TYGB para promover fase exponencial prolongada. Já o colífago ΦX-174 foi propagado utilizando-se como hospedeira a cepa *Escherichia coli* ATCC 13706, seguindo o protocolo descrito na norma ISO 10705 parte 2 para ensaios de fago somático (ISO, 2000).

A inoculação dos microrganismos foi realizada durante o processo de homogeneização do lodo de forma gradual. Inicialmente, pequenas porções de lodo, acondicionadas em bandejas plásticas de 20L, foram homogeneizadas manualmente com o inóculo de *Salmonella entérica* e do colífago ΦX-174. À medida que o volume de lodo aproximou-se de 20 kg, a mistura passou a ser processada em betoneira, garantindo a distribuição uniforme dos microrganismos em toda a massa.

Após a inoculação completa de 60 kg de lodo, o material foi repartido em três frações iguais de 20 kg cada, correspondentes às unidades experimentais: uma destinada ao tratamento com cal virgem, outra com cal hidratada e a terceira sem adição de cal (controle). Assegurando que todas as unidades experimentais partissem de uma base microbiológica mais homogênea possível, permitindo uma avaliação comparativa confiável da eficiência dos tratamentos de estabilização alcalina.

3.3.3 Definição da massa de lodo e massas e concentrações de cal nas unidades experimentais para avaliação microbiológica

A definição da massa de lodo utilizada no experimento para avaliação microbiológica seguiu conforme utilizado na avaliação físico-química. A definição da concentração de cal empregada, foi estabelecida com base nos resultados de manutenção de pH do lodo durante o processo de estabilização alcalina. A proporção de cal considerada mais eficiente para ambos os agentes alcalinizantes foi de 30% em relação à massa seco do lodo, tanto para cal virgem quanto para cal hidratada.

A proporção de 30% foi selecionada pois demonstrou-se que essa dosagem foi eficaz na manutenção de pH acima de 12 durante todo o período experimental de

30 dias. Embora as proporções de 40% e 50% também tenham garantido a alcalinidade necessária ao longo do experimento, a escolha de 30% se deu por ser a concentração mínima capaz de atingir o mesmo efeito, permitindo a redução de consumo de cal sem comprometer a eficiência do processo (vide resultados apresentados na seção 4.1.1).

Cada unidade experimental foi composta por 20 kg de lodo anaeróbio desaguado em centrífuga mais a adição da respectiva quantidade de cal, acondicionado em bandejas plásticas de 20 L. Como a avaliação microbiológica contou com um número reduzido de unidades experimentais, em relação à avaliação físico-química, devido à utilização de apenas uma concentração de cal por tipo de alcalinizante e à ausência de réplicas, foi possível conduzir simultaneamente a estabilização alcalina com cal virgem e cal hidratada. Assim como na etapa anterior, essa escala permitiu a realização de todas as análises microbiológicas previstas.

O cálculo da quantidade de cal a ser adicionada ao experimento microbiológico foi realizado com base no teor de sólidos totais (ST) do lodo determinado no dia da experimentação. Esse valor de Sólidos Totais (%) está apresentado na TABELA 12. Além disso, considerou-se a massa de lodo por unidade experimental, fixada em 20 kg. Dessa forma, a proporção de cal definida (30%) foi convertida para a massa equivalente ao teor de ST encontrado, utilizando a EQUAÇÃO (1), supracitada na seção 3.2.2 referente à avaliação físico-química.

A configuração do experimento com a proporção de cal, massa de lodo e cal e as réplicas das unidades experimentais para realização das avaliações microbiológicas estão apresentadas na TABELA 13.

TABELA 13 - MASSA DE CAL UTILIZADA PARA CADA PROPORÇÃOO NO EXPERIMENTO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA PARA AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA

Proporção de cal	Teor de sólidos	Nº de réplicas	Massa de lodo	Massa de cal
0% (controle, sem adição de cal)	22,01 % (vide TABELA 12)	1	20 kg	0 kg
30% cal virgem		1	20 kg	1,32 kg
30% cal hidratada		1	20 kg	1,32 kg

Fonte: O autor (2025).

As cales utilizadas para avaliação microbiológica foram as mesmas utilizadas na avaliação físico-química. A composição química das cales utilizadas foi previamente apresentada na TABELA 9, na seção 3.2.2 referente à avaliação físico-química. Essa caracterização é essencial para compreender as diferenças entre os tipos de cal e a sua influência na redução da carga microbiológica ao longo do experimento.

3.3.4 Procedimentos iniciais e instalação experimental para avaliação microbiológica

Os procedimentos iniciais do experimento microbiológico seguiram a mesma estrutura da avaliação físico-química, com algumas adaptações metodológicas específicas.

Inicialmente, 60 kg de lodo foram homogeneizados mecanicamente em betoneira, correspondendo às três condições experimentais: 20 kg para o controle (sem adição de cal), 20 kg para o tratamento com cal virgem e 20 kg para o tratamento com cal hidratada. Durante essa homogeneização inicial, foi realizada a inoculação de *Salmonella spp.* e bacteriófagos, assegurando a presença de microrganismos-alvo para posterior avaliação da eficiência do tratamento alcalino na redução microbiológica.

Após inoculação e homogeneização, o lodo foi divido em três porções de 20kg. As porções destinadas aos tratamentos alcalinos receberam a adição de cal na proporção de 30%, incorporada gradualmente à massa do lodo enquanto a mistura ocorria na betoneira. Assim como na etapa anterior, a betoneira foi devidamente limpa entre a utilização das diferentes cales. Esse procedimento garantiu a distribuição homogênea do agente alcalinizante e a reprodutibilidade do experimento.

Em seguida, o material tratado foi transferido para bandejas plásticas retangulares de 20 L, que serviam como reatores experimentais. As unidades experimentais foram identificadas e alocadas no pátio coberto da ETE Santa Quitéria, garantindo proteção contra intempéries sem comprometer a interação do material com o ambiente. A disposição das unidades experimentais está apresentada na FIGURA 21.

FIGURA 21 – DISPOSIÇÃO DAS UNIDADES EXPERIMENTAIS PARA AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA

FONTE: O Autor (2025).

As amostras foram coletadas após a mistura lodo-cal e início do processo de estabilização alcalina. Estas coletadas iniciais foram destinadas para a avaliação microbiológica, acompanhamento de pH, de maneira análoga ao que foi feito na avaliação físico-química, e nitrogênio amoniacal.

Após a montagem das unidades experimentais, os termopares foram inseridos na massa do lodo para realizar um monitoramento de temperatura durante as horas iniciais do experimento destinado à avaliação microbiológica. A aquisição dos dados foi realizado por meio do *FiedlLogger* 512k utilizado na etapa anterior, permitindo o registro contínuo das variações térmicas em cada tratamento.

Desta maneira, houve a montagem de 3 tratamentos de estabilização alcalino do lodo de esgoto para a avaliação microbiológica. Um tratamento controle com 20kg de lodo sem adição de cal; um tratamento com 20 kg de lodo e adição de 30% de cal virgem em relação ao peso seco do lodo e; um tratamento com 20 kg de lodo e adição de 30% de cal hidratada em relação ao peso seco do lodo.

3.3.5 Método de amostragem para avaliação microbiológica

As coletas foram realizadas pelo turno da manhã no pátio coberto da ETE Santa Quitéria, onde o experimento foi conduzido, ao longo de todo o período experimental de 30 dias.

Para amostragem foram utilizadas espátulas estéreis para remover o lodo da camada interna de cada unidade experimental, evitando possíveis contaminações externas. O material coletado foi imediatamente transferido para coletores plásticos

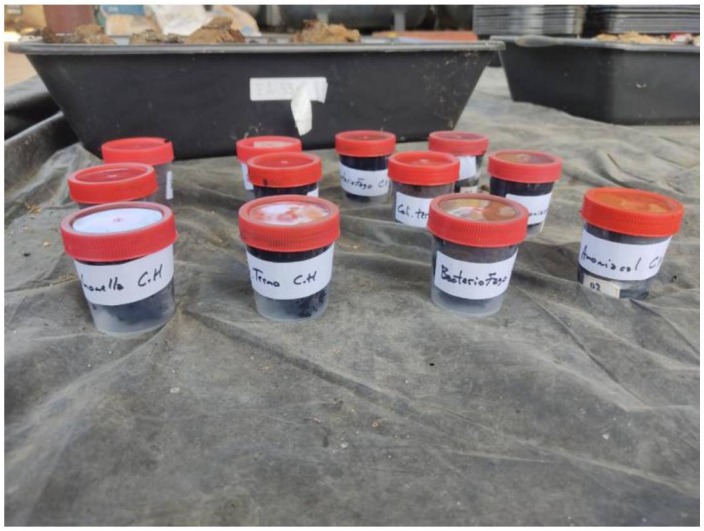
estéreis, devidamente identificados, conforme visto na FIGURA 22, e armazenado em caixas isotérmicas refrigeradas para manter sua integridade microbiológica até a chegada ao laboratório.

Para evitar a transferência de microrganismos entre as amostras, as espátulas foram higienizadas com solução de diluição estéril e papel toalha descartável. Além disso, foram coletadas amostras independentes para cada um dos parâmetros microbiológicos analisados, incluindo coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos, *Salmonella spp.* e bacteriófagos, garantindo a rastreabilidade dos resultados microbiológicos.

As análises microbiológicas foram realizadas em três laboratórios distintos, conforme a disponibilidade operacional e a especialização de cada um. O laboratório da SANEPAR conduziu as análises de coliformes termotolerantes nos dias 0, 7 e 14, pois essas análises são realizadas apenas às segundas-feiras. Da mesma forma, a quantificação de *Salmonella spp.* foi realizada apenas no 0 dia, uma vez que o laboratório da SANEPAR realiza essa análise apenas uma vez ao mês, na primeira semana, impossibilitando sua execução nos demais tempos experimentais.

Diante dessas limitações, as análises de coliformes termotolerantes e *Salmonella spp.* nos tempos 3 e 30 dias foram realizadas em um laboratório comercial externo. Esse mesmo laboratório também foi responsável pela quantificação de nitrogênio orgânico nos tempos de 0 dia no controle e no tempo de 30 dias no controle e tratamentos com cal.

FIGURA 22 – COLETORES DE PLÁSTICOS UTILIZADOS PARA AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA



FONTE: O Autor (2025).

A distribuição das análises realizadas em cada tempo e laboratório está apresentada no QUADRO 6.

QUADRO 6 – PARÂMETROS MICROBIOLÓGICOS ANALISADOS E RESPECTIVOS LABORATÓRIOS DE ANÁLISE CONFORME OS DIAS DE AMOSTRAGEM

Parâmetros	**Laboratórios**		
	SANEPAR	**UFSC**	**Externo**
Coliformes termotolerantes	0d; 7d; 14d.	-	3d; 30d.
Salmonella spp.	0d.	-	3d; 30d.
Ovos viáveis de helmintos (*Ascaris spp.*)	0d.	-	-
Bacteriófagos	-	0d; 3d; 7d; 14d; 21d; 30d.	-

LEGENDA: d – dia.

FONTE: O Autor (2025).

Para a avaliação da redução de vírus, as análises de bacteriófagos foram conduzidas pelo laboratório RReSSa (UFSC), especializado nesse tipo de ensaio. Para garantir a integridade das amostras, todas as coletas referentes aos bacteriófagos foram armazenadas em refrigerador no LABEAM (UFPR), devidamente identificadas e seladas para evitar contaminações, e enviadas em um único lote para o laboratório RReSSa (UFSC) em Florianópolis (SC) após a conclusão do período experimental de 30 dias.

3.3.6 Frequência das coletas e parâmetros analisados para avaliação microbiológica

A avaliação microbiológica do experimento de estabilização alcalina do lodo de esgoto foi conduzida no período experimental de 30 dias, a fim de monitorar a dinâmica de inativação dos microrganismos ao longo do tempo. As coletas e análises microbiológicas foram realizadas conforme frequência apresentada no QUADRO 7.

O QUADRO 7 apresenta os dias de monitoramento dos parâmetros em relação ao início do experimento.

QUADRO 7 – FREQUENCIA DE MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS ANALISADOS PARA AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA

Parâmetro	Dias de coleta ou monitoramento
Coliformes termotolerantes	0d; 3d; 7d; 14d e; 30d.
Salmonella spp.	0d; 3d e; 30d.
Ovos viáveis de helmintos (*Ascaris* spp.)	0d.
Bacteriófagos	0d; 3d; 7d; 14d e; 30d.
Nitrogênio amoniacal	0d e; 30d.

LEGENDA: d – dia.

FONTE: O Autor (2025).

Os métodos utilizados para obtenção dos parâmetros utilizados na avaliação microbiológico estão apresentados no QUADRO 8.

QUADRO 8 – MÉTODOS UTILIZADOS NO EXPERIMENTO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA PARA AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA

Parâmetro	Método
Coliformes termotolerantes	Tubos múltiplos em meio A-1(USEPA, 2006a)
Salmonella spp	(USEPA, 2006b)
Bacteriófagos	(ISO, 2000)
Ovos viáveis de helmintos	(USEPA, 2003)
Nitrogênio amoniacal	Método 4500-NH_3F(APHA, 2017)

FONTE: O Autor (2025).

3.3.6.1 Processo para obtenção de coliformes termotolerantes

Para obtenção dos resultados de coliformes termotolerantes, utilizou-se o método de tubos múltiplos em meio de cultura A-1, conforme estabelecido pela USEPA. O método fundamenta-se na fermentação de lactose e na produção de gás a 44,5°C ± 0,2°C, temperatura seletiva para coliformes termotolerantes que serve como indicativo de atividade metabólica.

A preparação das amostras foi realizada utilizando uma proporção de 1:100 entre a massa de lodo, em gramas, e a solução de diluição, com correção prévia de pH, em miligramas. Para cada unidade experimental, 30g de lodo foram homogeneizados manualmente e transferidos para um copo Becker de 500mL. Em

seguida, adicionou-se 250mL de água de diluição estéril (0,1% de peptona), resultando em uma suspensão inicial.

Devido à elevada alcalinidade do lodo, proveniente do processo de estabilização alcalina, a suspensão foi submetida à neutralização com ácido clorídrico (HCl 0,1N). A adição do ácido foi realizada de forma gradual sob agitação constante em agitador magnético, enquanto o pH era monitorado até atingir faixa de 7,0 a 7,5, garantindo condições fisiológicas adequadas para a análise microbiológica.

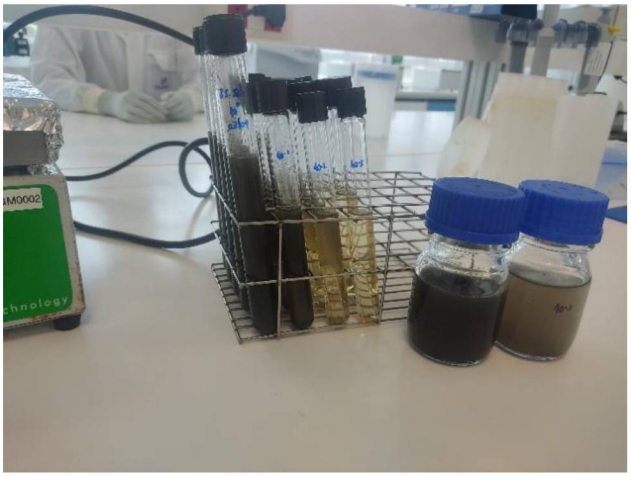
Após a correção do pH, completou-se o volume da suspensão com água de diluição estéril até atingir 300mL, mantendo a proporção de 1:100 (30g de lodo para 300mL de solução). A homogeneização final foi realizada em um liquidificador estéril por 1 minuto para garantir dispersão uniforme para o processo de diluição e incubação.

A partir da suspensão 1:100, preparou-se diluições seriadas decimais. Para a primeira diluição foram adicionados 90mL de água de diluição e 10mL da suspensão homogeneizada. Em seguida, para a próxima diluição foram acrescentados 90mL de água de diluição mais 10mL da diluição anterior. Desta forma, foram feitas 3 diluições de ordem 10^{-1}, 10^{-2} e 10^{-3}.

Após o processo de diluição, alíquotas de 1mL foram inoculadas em quintuplicata em tubos contando 10mL de meio de cultura A-1 e tubo de Durham invertido em seu interior. Estes frascos foram levados a 3 horas em estufa entre 34,5°C e 35,5°C e posteriormente a banho-maria por 21 horas à temperaturas entre 44,3°C e 44,7°C. Controles positivos foram feitos com cepas de *Escherichia coli* e o controle negativo foi feito com cepas de *Salmonella*, ambos em meio A-1.

A FIGURA 23 mostra as diluições seriadas e os frascos com os tubos de Durham invertidos em seu interior, estas amostras foram encaminhadas à incubação em estufa e banho-maria.

FIGURA 23 – FRASCOS E TUBOS CONTENDO AMOSTRA DE LODO PARA REALIZAÇÃO DO MÉTODO DE OBTENÇÃO DE COLIFORMES TERMOTOLERANTES



FONTE: O autor (2025).

A presença de coliformes termotolerantes foi confirmada pela turvação do meio e formação de gás capturado pelo tubo de Durham invertido. Tubos positivos foram contabilizados por diluição, e o Número Mais Provável (NMP) de microrganismos por grama de sólidos totais (NMP/g.ST) foi calculado utilizando tabelas estatísticas padrão para estimar o NMP de coliformes termotolerantes.

3.3.6.2 Processo para obtenção de Salmonella

A detecção de *Salmonella* spp. foi realizada conforme o método *Modified Rappaport-Vassiliadis* (MSRV), seguindo o protocolo estabelecido pela *Environmental Protection Agency*. O método fundamenta-se no enriquecimento seletivo em meio semissólido, seguindo de conformação bioquímica e sorológica, permitindo a identificação do patógeno em matrizes complexas como o lodo de esgoto sob processo de estabilização alcalina.

A preparação da amostra seguiu o mesmo protocolo descrito para coliformes termotolerantes, com proporção 1:100 (30g de lodo para 300mL de solução de diluição). A neutralização prévia do pH (7,0-7,5) com HCl 0,1N garantiu condições adequadas para a recuperação de células viáveis de *Salmonella* spp., minimizando efeitos inibitórios do pH elevado.

Foi realizado o pré-enriquecimento com 25mL da suspensão homogeneizada transferidos para frascos contendo 225mL de caldo lactosado, incubados a 37°C ± 1°C por 24 ± 2 horas para recuperação de células potencialmente estressadas. Após

o pré-enriquecimento, 0,1mL do caldo foi transferido para 10mL de caldo Rappaport-Vassiliadis (RV) modificado, incubado a 41,5°C ± 0,5°C por 24 ± 2 horas.

Alíquotas de 10µL do caldo RV foram inoculadas em placas de ágar MSRV e incubadas a 41,5°C ± 0,5°C por 24 ± 2 horas. A presença de *Salmonella* spp. foi indicada pela formação de halos de migração radial com tamanhos maiores que 2cm. Estes halos criados no meio MSRV foram estriados em placas com meio *Xylose Lysine Deoxycholatei* (XLD), que foram incubadas por 24 horas à 30°C ± 1,5°C.

As placas em meio XLD que apresentaram a produção de sulfeto de hidrogênio (H2S), indicado por pontos pretos dentro da colônia formada na placa, foram considerados positivos para o meio XLD. A formação destas colônias no meio XLD foram subcultivados em ágar *Triple Sugar Iron* (TSI) *e Lysine Iron Agar* (LIA) a 37°C ± 1°C por 24 horas. Os ágares que apresentaram padrões de fermentações com fundo amarelo e topo vermelho, para TSI e alcalinização para LIA, além de precipitações negras pela formação de H_2S confirmam o gênero *Salmonella.*

A presença/ausência de *salmonella* spp. foi confirmada pela presença dos padrões de fermentação dos ágares em TSI e LIA. Os ágares positivos foram contabilizados, e o Número Mais Provável (NMP) de microrganismos por 4 grama de sólidos totais (NMP/4g.ST) foi calculado utilizando tabelas estatísticas padrão para estimar o NMP de *salmonella*.

3.3.6.3 Processo para obtenção de bacteriófagos

O ensaio para os bacteriófagos foi realizado seguiu o método de dupla camada de ágar com o plaqueamento dos bacteriófagos ΦX (ADAMS, 1959), seguindo as normas ISO 10705 parte 2. O resultado foi obtido em Unidades Formadoras de Placas por milímetros (UFC/mL).

3.3.6.4 Demais processos utilizados para caracterização inicial e final do lodo sob tratamento de estabilização alcalina para avaliação microbiológica

A detecção, avaliação de viabilidade e enumeração de ovos de helmintos foi realizada por meio do método de centrifugação-flutuação. O método permite a identificação de ovos viáveis de parasitas intestinais, como *Ascaris* spp., em matrizes ambientais complexas, como o lodo de esgoto usado no experimento para avaliação microbiológica.

Os resultados foram expressos em ovos viáveis por gramas de sólidos totais (ovos/g.ST), com limite de detecção validado de < 0,1 ovos/g.ST, determinado por análises em triplicata. A realização deste método para obtenção do resultado foi apenas para o dia zero do experimento, haja visto que não foram detectados ovos viáveis do lodo de esgoto usado no experimento. Desta maneira não foi possível a realização da avaliação do parâmetro ovos viáveis de helmintos no experimento conduzido para avaliação microbiológica.

A quantificação de nitrogênio amoniacal (NH_3-N) no lodo de esgoto foi realizada por espectrofotometria no visível, seguindo o método 4500-NH_3F do *Standard Methods for the Examination of Water and Waterwater*. Este método baseia-se na reação do amônio com hipoclorito e fenol em meio alcalino, formando o composto indofenol azul, cuja absorbância é proporcional à concentração de NH_3-N. A técnica foi adaptada para matrizes de lodo alcalinizado.

A análise foi conduzida nos tempos 0 e 30 dias do experimento de estabilização alcalina para avaliação microbiológica. Os resultados foram expressos em miligrama de nitrogênio amoniacal por quilograma de sólidos totais (mg NH_3-N/kg.ST) e permitiram correlacionar a redução de NH_3-N com a elevação de pH e a volatilização da amônia, mecanismo crítico para a atenuação de odores e conformidade com diretrizes de biossegurança de biossólidos.

Com essa metodologia, foi possível monitorar a evolução dos parâmetros microbiológicos ao longo do período experimental, fornecendo dados para a avaliação microbiológica do lodo, como a inativação dos diferentes organismos patógenos sob processo de estabilização alcalina com uso de 30% de cal virgem e cal hidratada em relação ao ST(%) do lodo. Além da caracterização do lodo quanto à presença de ovos viáveis de helmintos e comportamento do nitrogênio amoniacal perante ao processo de estabilização alcalina do lodo de esgoto.

QUADRO 9 - METODOLOGIA DE TRABALHOS COM ESTABIIZAÇÃO ALCALINA DE LODO DE ESGOTO

Autor	Tipo de lodo	Desaguamento	Teor de ST	Proporção de cal	Tipo de cal	Réplica	Reator	Parâmetros analisados
Godinho (2003)	Anaeróbio	Leito de secagem	30% – 40%	30%; 40% e; 50%	-	-	Bandejas plásticas	Físico-químicos
Mader Netto *et al.* (2003)	Anaeróbio	Leito de secagem	-	10%; 20%; 30%; 40% e; 50%	Virgem	4x	Potes plásticos	Físico-químicos
Pegorini *et al.* (2006a)	Anaeróbio	Prensa e leito de secagem	12% – 35% – 63%	0%; 50%; 100%; 200% e; 300%	-	-	Embalagens plásticas	Físico-químicos
Rocha (2009)	Anaeróbio	Leito de secagem	40% – 50%	15%; 25% e; 35%	Virgem e hidratada	3x	Sacos plásticos	Físico-químicos e microbiológicos
Coldebella (2015)	Anaeróbio	Centrífuga	17,9% – 22,5%	20%; 30% e; 40%	Virgem	3x	PVC (Diâmetro: 255 mm, Altura: 700 mm)	Físico-químicos e microbiológicos
Souza *et al.* (2018)	Anaeróbio	Centrífuga e leito de secagem	19% – 72%	-	Virgem	4x	Baldes plásticos	Físico-químicos

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos para determinar a dose de cal mínima e período mínimo necessários para obtenção de biossólido, em processo de estabilização alcalina de lodo de esgoto doméstico, estão apresentados neste capítulo.

Inicialmente foram abordados e discutidos os resultados da avaliação dos parâmetros físico-químicos e, posteriormente, são apresentados e discutidos os resultados da avaliação dos parâmetros microbiológicos, ambas avaliações feitas de lodo anaeróbio, desaguado em centrífuga, sob processo de estabilização alcalina com uso de diferentes doses de cal virgem e cal hidratada.

4.1 AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LODO SOB PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA

A avaliação físico-química do lodo de esgoto tratado por estabilização alcalina é essencial para compreender o comportamento da matriz ao longo do tempo e identificar a dose mínima de cal capaz de garantir a elevação e manutenção do pH em valores críticos para a higienização do lodo. Nesta seção, apresentam-se os resultados referentes ao potencial hidrogeniônico (pH), aos sólidos totais (ST) e à temperatura do lodo ao longo dos 30 dias de experimento, em tratamentos com diferentes proporções de cal virgem e cal hidratada.

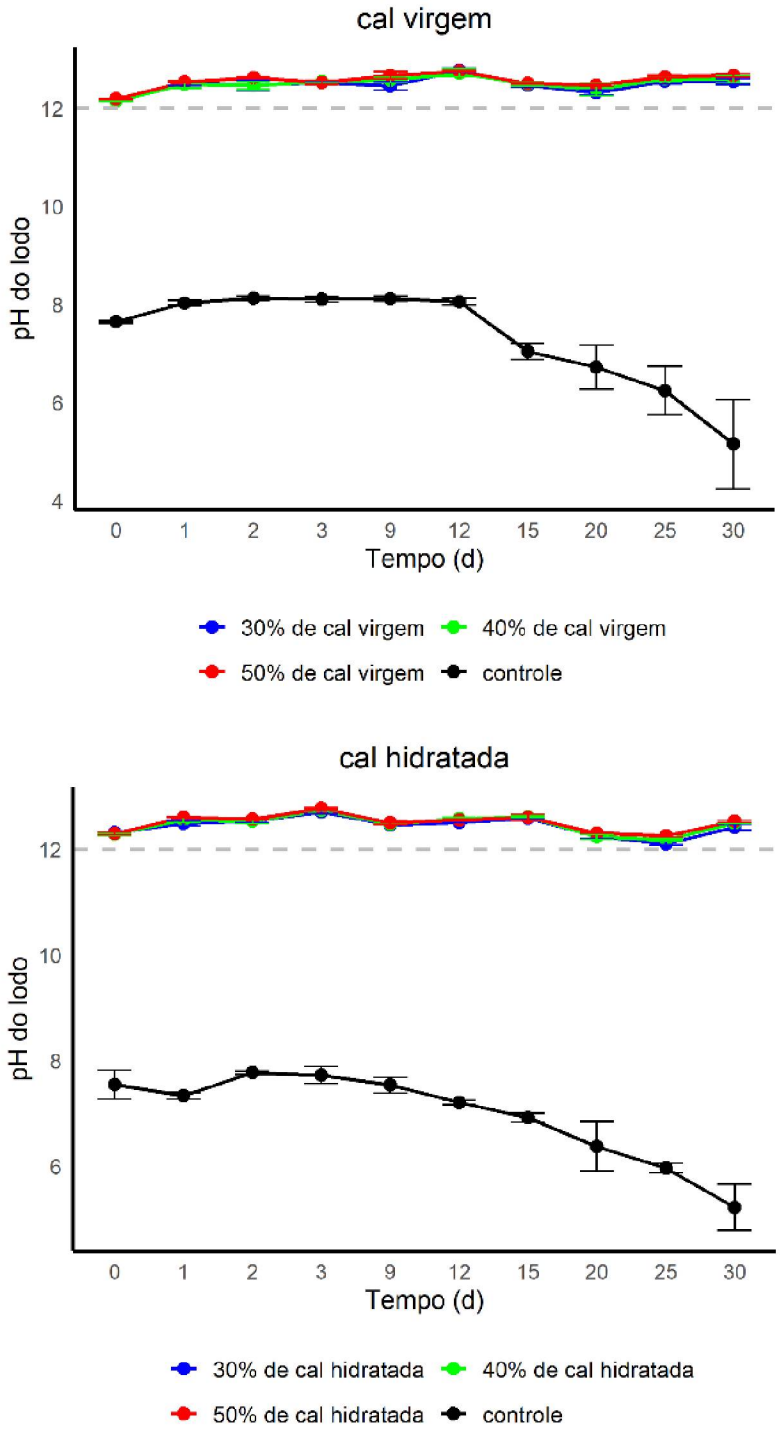
4.1.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

A FIGURA 24 apresenta os resultados da evolução do pH das amostras de lodo, ao longo dos 30 dias de experimento. Observou-se que todas as proporções testadas, tanto com cal virgem quanto com cal hidratada, promoveram a elevação do pH para valores superiores a 12 logo nas primeiras horas de tratamento e mantiveram esse patamar durante todo o período experimental de 30 dias.

A manutenção da alcalinidade ao longo do tempo evidencia a eficácia da estabilização com ambas as formas de cal, independentemente da dosagem aplicada. Ressalta-se, contudo, que a dose de 30% mostrou-se suficiente para atingir e manter os níveis de pH exigidos pela Resolução CONAMA n° 498/2020, a qual estabelece,

como critério para a caracterização do lodo como biossólido, a manutenção do pH acima de 12 por, no mínimo, três dias.

FIGURA 24 - VALORES DE pH DO LODO ANAERÓBIO SOB ESTABILIZAÇÃO ALCALINA



FONTE: O Autor (2025).

Não foram observadas variações significativas entre as diferentes concentrações de cal, o que sugere que a elevação de pH é rapidamente estabilizada e pouco influenciada por aumentos de dosagem acima de 30%, corroborando com os achados de Silva *et al*. (2023), que também identificaram 30% como a dose mínima eficaz para transformação de lodo urbano em biossólido. O mesmo é evidenciado por Mora e Mejía (2024), que relataram manutenção de pH acima de 12 por mais de 30 dias em ensaios com doses equivalentes.

Embora as doses de 40% e 50% tenham mantido o pH elevado durante todo o período experimental, o uso de doses de 30%, como a menor quantidade de insumo, implica em uma otimização dos recursos utilizados e menor impacto ambiental sem comprometer a eficiência do processo de estabilização alcalina. O uso de doses acima de 30% não proporciona benefícios adicionais positivos para manutenção de pH elevado no processo de estabilização alcalina por um período de 30 dias.

Alguns autores encontraram reduções de patógenos nos primeiros dias de tratamento para doses equivalentes ao usado neste estudo. Por exemplo, Popova *et al*. (2014), Chaudhary e Gough (2021) e Cuetero-Martínez *et al*. (2023) relataram a eficácia do pH elevado em inibir patógenos como coliformes termotolerantes e ovos de helmintos, mesmo em exposições curtas, entre 2 horas e 3 dias. Esse comportamento é essencial, considerando a viabilidade sanitária do uso agrícola do lodo e sua estabilidade microbiológica.

Chaudhary e Gough (2021) observaram valores de pH superiores a 12 para doses de 20% e 25% de cal, além de reduções de microrganismos patogênicos. Lopes *et al*. (2020) e Cuetero-Martínez *et al*. (2023) relataram reduções de patógenos em seus lodos submetidos ao processo de estabilização alcalina, alcançando níveis de transformação em biossólido Classe A, com pH maior que 12 por apenas 2 horas.

O resultado evidencia a eficiência técnica do processo e reforça que a escolha da menor dose viável (30%) promove ganhos econômicos e ambientais, ao reduzir o consumo de reagente e produção de resíduos com excesso de cal residual, sem comprometer a qualidade sanitária do produto final.

Os valores de pH encontrados durante todo o experimento realizado na avaliação físico-química estão no APÊNDICE 1 – tabelas dos valores de ph.

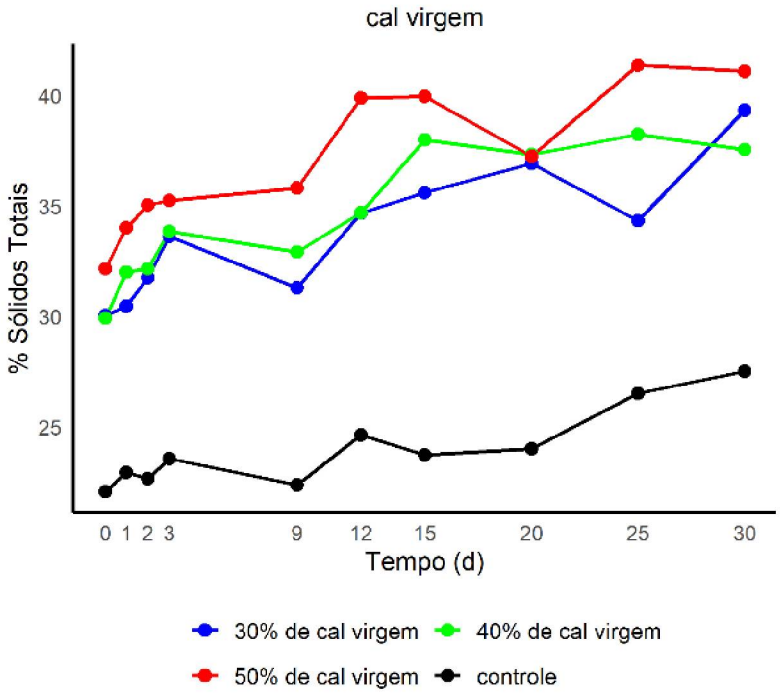
4.1.2 Sólidos totais (ST)

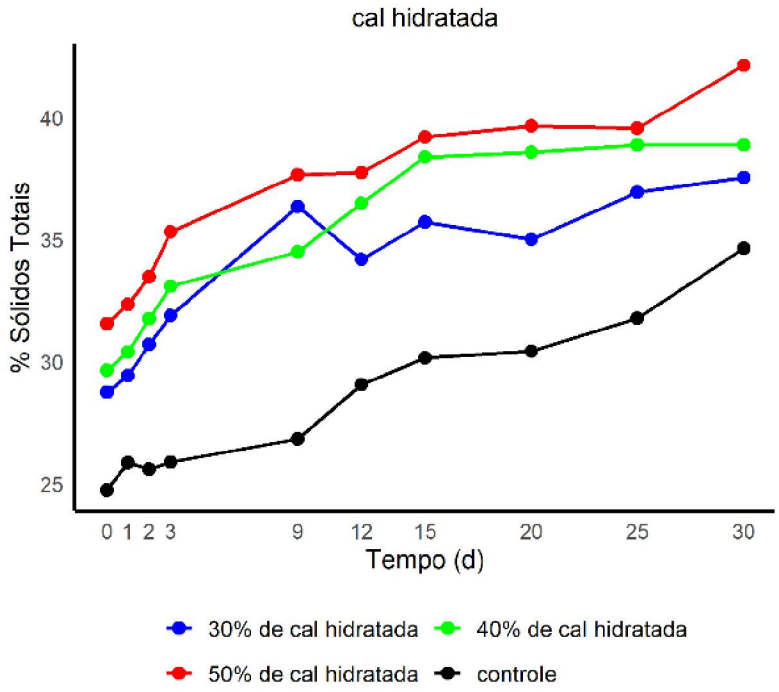
A FIGURA 25 apresenta o resultado da evolução dos teores de sólidos totais (ST) ao longo dos 30 dias de monitoramento. Observou-se uma tendência de aumento gradual nos valores de ST à medida que se aplicam doses mais elevadas de cal. Esse comportamento é esperado, uma vez que a cal adicionada à matriz do lodo representa um incremento direto de material sólido. As doses de 50% apresentam os maiores teores de ST, seguidas pelas doses de 40% e 30%, em ambos os tipos de cal.

Notou-se, ainda, variações pontuais negativas nos dados de ST entre alguns períodos de coleta, como a redução entre os dias 15 e 20 no tratamento com 50% de cal virgem e entre os dias 9 e 12 para a dose de 30% com cal hidratada. Essas oscilações podem estar associadas à heterogeneidade da umidade nas unidades experimentais, característica comum em estudos em escala piloto.

Durante a coleta das amostras, observou-se visualmente uma maior umidade nas camadas profundas do lodo e maior ressecamento nas camadas superiores, como ilustrado no item a) da FIGURA 26. Tal condição interfere na representatividade das amostras compostas, dificultando a padronização e contribuindo para pequenas variações nos dados.

FIGURA 25 - VALORES DE SÓLIDOS TOTAIS DO LODO ANAERÓBIO SOB ESTABILIZAÇÃO ALCALINA





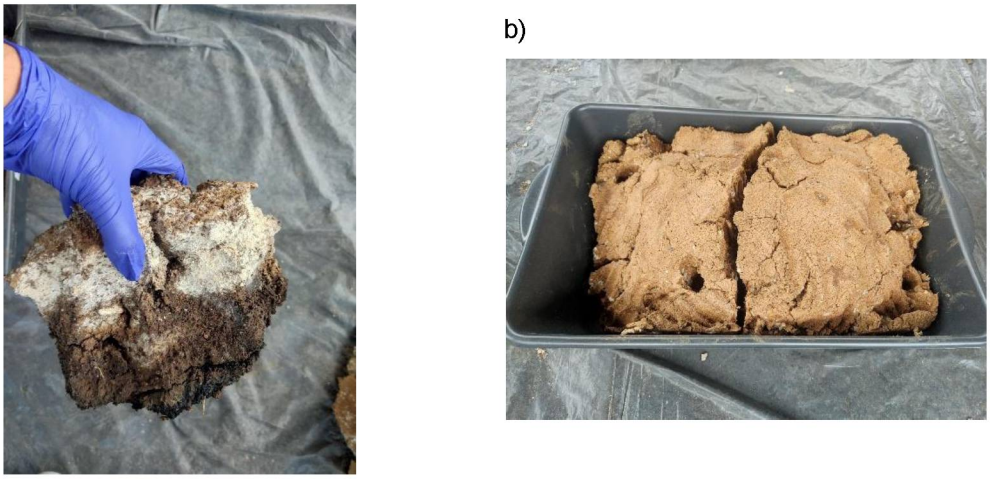
FONTE: O autor (2025).

Ainda, observou-se a formação de uma crosta superficial rígida nas unidades com tratamento, de coloração acinzentada como visto no item b) da FIGURA 26. Essa crosta funciona como uma barreira física, contribuindo para a retenção de umidade nas camadas internas e, consequentemente, desacelerando a redução de umidade ao longo do tempo. Essa característica, embora não afete diretamente a eficiência da estabilização alcalina, pode influenciar na operação unitária de secagem do lodo de esgoto.

Os resultados indicam que, os teores de ST não alcançaram os 50% exigidos pela resolução brasileira, mesmo nos tratamentos com maior proporção de cal. Dessa forma, os dados mostram que a exigência de 50% de ST não foi plenamente atendida, o que limita o enquadramento do processo nos moldes da alternativa 1 apresentada no QUADRO 3, retirada da Resolução CONAMA 498/2020.

FIGURA 26 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO LODO DE ESGOTO ANAERÓBIO SOB PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA

a) b)



FONTE: O autor (2025).

Essa realidade pode ser atribuída às condições experimentais de escala piloto, à curta exposição à secagem natural ou falta de secagem adicional, e à retenção de umidade nas camadas internas causadas pela crosta superficial observada. Os resultados obtidos traz a importância de, em futuras investigações, avaliar estratégias complementares de secagem para possibilitar o alcance do critério de sólidos totais da resolução brasileira.

Essa análise demonstra a importância de compreender não apenas os aspectos químicos da estabilização alcalina, como o pH, mas também os condicionantes físicos envolvidos na produção de um biossólido com qualidade legalmente conhecida.

Os valores de sólidos totais encontrados durante todo o experimento realizado na avaliação físico-química estão no APÊNDICE 2 – tabelas dos valores de sólidos totais.

4.1.3 Temperatura (T)

A FIGURA 27 apresenta o monitoramento da temperatura do lodo durante as 12 horas iniciais do experimento, intervalo no qual se concentram os efeitos térmicos mais significativos. Observou-se que os tratamentos das unidades experimentais com cal virgem promoveram aumentos expressivos na temperatura do lodo,

comportamento esperado devido à reação exotérmica da hidratação do óxido de cálcio presente na cal virgem.

A dose de 50% apresentou o maior pico térmico, atingindo 41,27°C nos primeiros 10 minutos após mistura do lodo com a cal virgem, essa mistura proporcionou valores acima de 40°C por um período de 80 minutos; de 2 horas até 6 horas de tratamento, o lodo se manteve em temperaturas próximas de 35°C e; das 6 horas de tratamento em diante o lodo estabilizou em valores entre 25°C e 30°C;

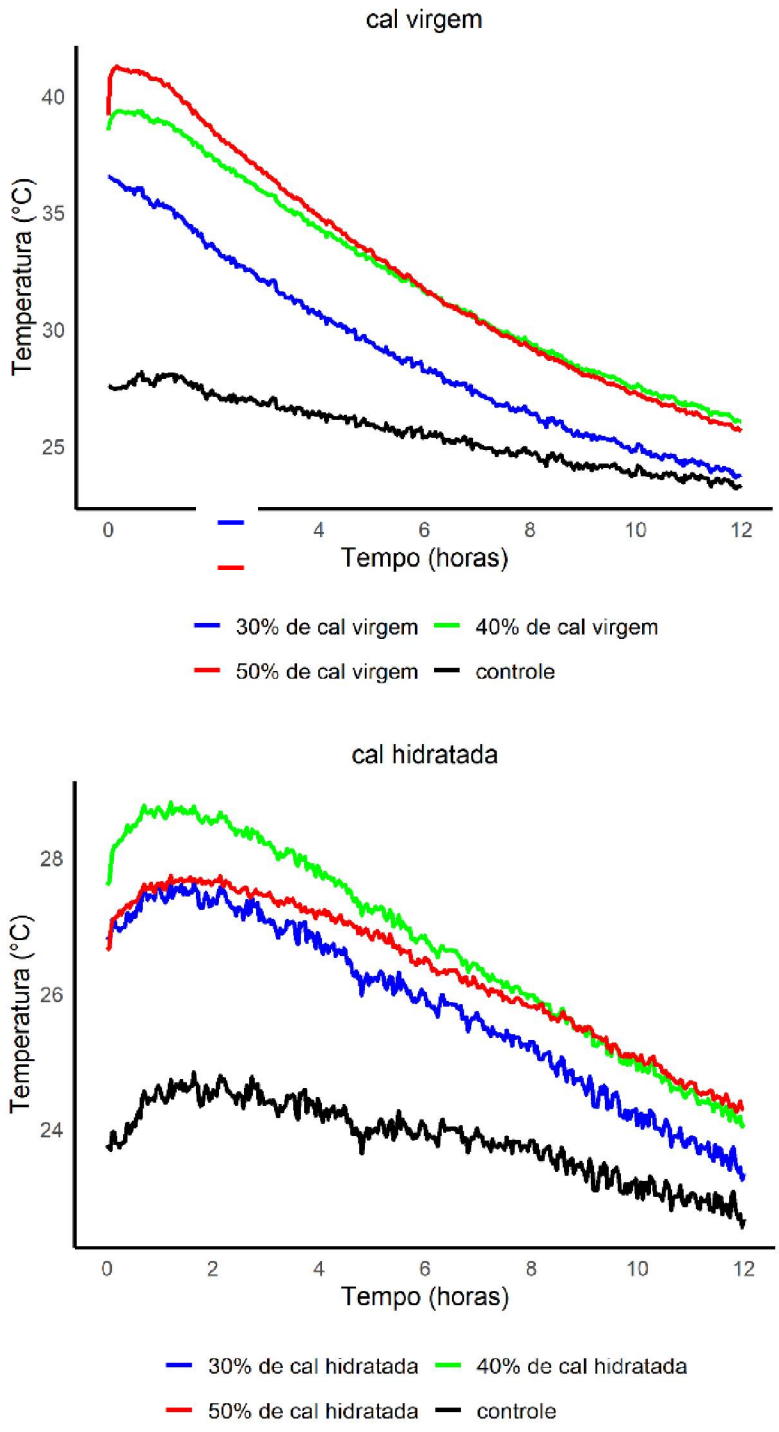
O tratamento com 40% alcançou um máximo de 39,37°C, também no tempo de 10 minutos e teve um comportamento semelhante com a dose de 50%, porém não chegou a atingir valores maiores que 40°C. Enquanto a dose de 30% chegou a 36,52°C nos minutos iniciais e se manteve a temperaturas maiores que 30°C por 4,5 horas. Em todos os casos, a elevação da temperatura se manteve acima de 30°C por várias horas, com duração de 4,5 horas na dose de 30%. Após o período de pico, a temperatura tendeu a se estabilizar, aproximando-se da temperatura ambiente.

Essa elevação térmica, associada ao pH elevado, representa uma condição altamente desfavorável à sobrevivência de microrganismos patogênicos. Segundo Pecson *et al*. (2007), em lodo sob condições de combinação de pH 12 e temperatura a 30°C e 40°C há ocorrência de diminuição significativa de ovos de helmintos como o Ascaris spp., mesmo em curtos períodos de exposição.

A temperatura do ar no momento da realização do experimento com cal virgem foi de 25,5°C, já para o experimento de cal hidratada a temperatura do ar estava em 22,9°C. Ambas as temperaturas foram medidas no local após a inserção dos termopares.

Para as unidades experimentais com utilização de cal hidratada, os tratamentos não apresentaram aumento significativo de temperatura, o que está de acordo com a ausência de reação exotérmica associada ao uso de hidróxido de cálcio. O controle se manteve inicialmente em temperaturas por volta de 25°C, enquanto as unidades de tratamento com as diferentes doses de cal hidratada ficaram com temperatura inicial por volta de 27°C e 28°C, com os respectivos máximos atingidos de 27,68°C; 28,83°C e; 27,74°C, para utilização de 30%, 40% e 50%, respectivamente, como apresentado na FIGURA 27. Esse aspecto reforça a viabilidade do uso da cal hidratada em contextos em que a segurança operacional e menor reatividade sejam prioridades.

FIGURA 27 - VALORES DE TEMPERATURA DO LODO ANAERÓBIO SOB ESTABILIZAÇÃO ALCALINA



FONTE: O autor (2025).

Chaudhary e Gough (2021), em condições de pH 12 a 25°C, encontraram reduções de coliformes fecais de 2 log, o que representa uma redução de 100.000NMP/g, em condições de pH 12 com temperatura de 25°C. Por outro lado,

Pecson *et al*. (2007) não registraram reduções de ovos de Ascaris quando a temperatura permaneceu em torno de 20°C. Esses resultados indicam que, a elevação térmica, embora desejável para intensificar a ação de redução dos patógenos, não é condição obrigatória para a eficácia do processo.

Embora o aumento da temperatura promovido pelas doses de cal virgem tenha sido significativo, os resultados de temperatura não atenderam aos critérios estabelecidos pela alternativa 1 do QUADRO 3, retirada da Resolução CONAMA 498/2020, para obtenção de biossólido Classe A. De acordo com a resolução, o processo de redução de patógenos por estabilização alcalina deve manter a temperatura acima de 50°C por pelo menos 12 horas durante o período que o pH estiver acima de 12.

Nenhuma das proporções de cales utilizadas foi capaz de elevar a temperatura do lodo acima de 50°C. O maior valor registrado foi de 41,27°C, obtido com a proporção de 50% de cal virgem em relação ao ST do lodo. Essa limitação pode estar associada à escala piloto do experimento, que utiliza uma massa reduzida em comparação com a escala plena, além da elevada umidade inicial das unidades experimentais, que pode ter dificultado a propagação e retenção térmica calor gerado pela hidratação da cal.

Estes resultados de temperatura trazem a necessidade de investigar estratégias complementares de elevação térmica, com o uso de tecnologias de aquecimento e aumento de temperatura. Tais medidas são importantes para permitir que o processo de estabilização alcalina atenda plenamente aos requisitos da normativos. Assim, viabilizando o enquadramento do biossólido produzido como biossólido Classe A, conforme preconizado pela Resolução CONAMA 498/2020.

Os valores de temperatura encontrados durante todo o experimento realizado na avaliação físico-química estão no APÊNDICE 3 – tabelas dos valores de temperatura.

4.2 AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA DO LODO SOB PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA

A avaliação microbiológica do lodo de esgoto tratado por estabilização alcalina é fundamental para determinar a eficácia do processo na redução de patógenos e para verificar o enquadramento do material como biossólido Classe A, conforme os

critérios estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 498/2020. Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados referentes aos parâmetros microbiológicos monitorados ao longo dos 30 dias de experimento, utilizando tratamentos com 30% de cal virgem e cal hidratada em relação ao teor de sólidos totais (ST) do lodo.

Paralelamente à avaliação microbiológica, foram realizadas as medições de pH do lodo para cada dia de amostragem. A TABELA 14 apresenta os valores de pH registrado durante este período.

TABELA 14 - VALORES DE pH DURANTE A AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA

Dia	pH		
	Controle	Cal virgem	Cal hidratada
0	7,59	12,31	12,17
3	7,66	11,91	11,62
7	7,66	11,60	11,49
14	7,03	11,35	10,61
30	3,79	9,45	10,19

FONTE: O Autor (2025).

Observa-se na TABELA 14 que, embora ambas as cales tenham elevado o pH inicial para valores acima de 12, houve um decaimento ao longo do tempo, especialmente após o sétimo dia, diferentemente do observado na avaliação físico-química (vide seção 4.1.1), onde o pH se manteve acima de 12 por 30 dias. Essa diferença pode estar relacionada a variações nas características do lodo utilizado em cada fase experimental, às condições específicas de armazenamento e manuseio das amostras destinadas à análise microbiológicas, ou, o mais provável, pela realização da homogeneização do lodo-cal com apenas 20kg de lodo, enquanto na avaliação físico-química a mistura foi feita com 60kg de lodo. Essa diferença de massa durante a homogeneização pode ter ocasionado uma baixa eficiência neste processo.

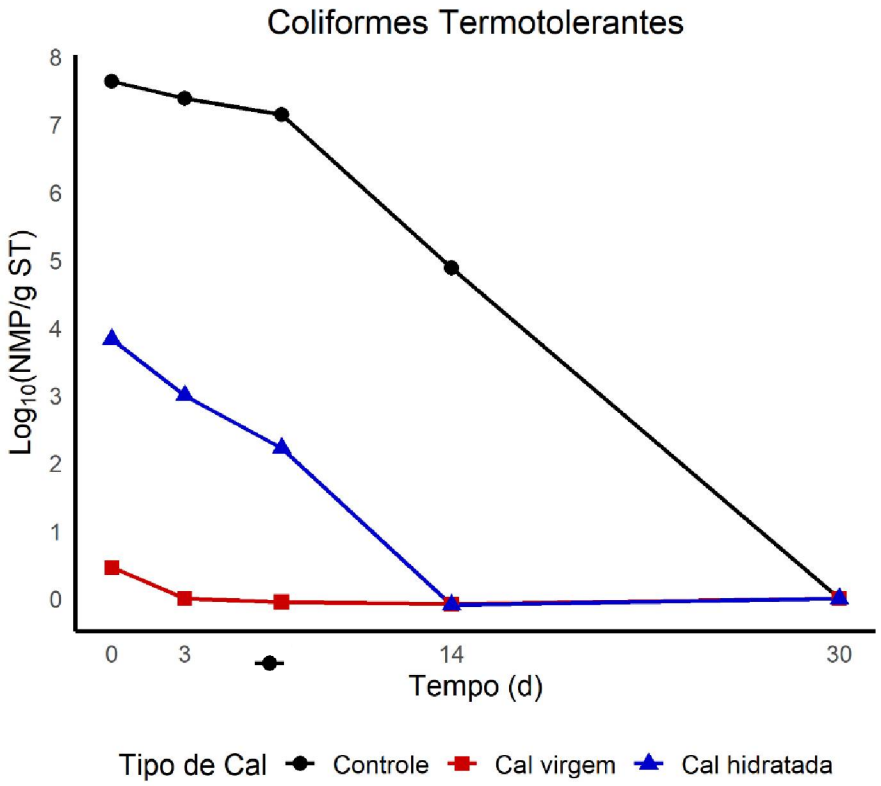
4.2.1 Coliformes termotolerantes

O lodo bruto (controle, dia 0) apresentou uma concentração inicial de coliformes termotolerantes de 4,41 x 10^7 NMP/g.ST. Este valor é considerado típico para lodos de esgotos domésticos anaeróbios, em conformidade com concentrações

reportadas na TABELA 2, como os de Lopes *et al.* (2020), El Hayany *et al.* (2021) e Cuetero-Martínez *et al.* (2023).

A FIGURA 28 apresenta a evolução da concentração de coliformes termotolerantes (em NMP/g.ST) ao longo do período experimental para os tratamentos com cal virgem e cal hidratada, além do controle sem adição de cal.

FIGURA 28 - REDUÇÃO DOS COLIFORMES TERMOTOLERANTES NO LODO DE ESGOTO SOB PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA



FONTE: O Autor (2025)

Observa-se na FIGURA 28 uma redução logarítmica acentuada na concentração de coliformes termotolerantes imediatamente após a aplicação de ambas as cales. No tratamento com cal virgem, a redução inicial (dia 0) foi de aproximadamente 7 logs, diminuindo a concentração de 4,41 x 10^7 NMP/g.ST para 2,89 NMP/g.ST, o que representa uma eficiência de remoção superior a 99,99%. Para o tratamento com cal hidratada, a redução inicial foi de cerca de 3,8 logs, com concentração passando de 4,41 x 10^7 NMP/g.ST para 6,80 x 10^3 NMP/g.ST, correspondendo a uma eficiência de 99,98%.

Essa expressiva redução inicial pode ser atribuída ao efeito sinérgico das condições adversas impostas aos microrganismos: o pH elevado (acima de 12, conforme TABELA 14) promovido por ambas as cales e, adicionalmente no caso da cal virgem, a elevação térmica resultante da reação exotérmica de hidratação. Diversos autores relatam eficiências significativas na redução de coliformes termotolerantes nas horas iniciais de tratamento alcalino. Lopes *et al.* (2020) encontraram redução de 5,25 Log_{10}NMP/g.ST após 2 horas com 25% de cal hidratada em lodo de UASB. Chaudhary e Gough (2021) registraram reduções próximas a 2,5 Log_{10}NMP/g.ST com 20% de cal em lodo a temperatura ambiente (~25°C). Cuetero-Martínez *et al.* (2023) observaram reduções de 5 Log_{10}NMP/g.ST em 2 horas com cal virgem (pH>12) em lodos de digestão anaeróbia. Mora e Mejía (2024) também reportaram reduções de 3 Log_{10}NMP/g.ST com 40% de cal virgem.

No terceiro dia de tratamento, a concentração de coliformes termotolerantes no tratamento com cal virgem já se encontraram abaixo do limite de detecção do método (< 0,83 NMP/g.ST), resultado consistente com Popova *et al.* (2014), Mora e Mejía (2024), que também não detectaram coliformes em períodos similares com proporções de cal virgem semelhantes. No tratamento com cal hidratada, a concentração no terceiro dia foi de 1,00 x 10^3 NMP/g.ST. Este valor, embora detectável, atende ao requisito da Resolução CONAMA n°498/2020 para biossólido Classe A, que estabelece um limite máximo de 10^3 *Escherichia coli* por grama de sólidos totais (Brasil, 2020). Considerando que *E.coli* é um subgrupo dos coliformes termotolerantes, o atendimento ao limite para o grupo mais abrangente implica conformidade com o requisito para *E.coli*.

Ao sétimo dia, as concentrações continuaram baixas: 0,89 NMP/g.ST para cal virgem e 1,68 x 10^2 NMP/g.ST para cal hidratada, ambas em conformidade com o limite máximo permitido da CONAMA 498/2020 para biossólido Classe A. Foi observado, também, um decaimento no controle com uma redução de 3 Log_{10}. A partir do décimo quarto dia, as concentrações em ambos os tratamentos (cal virgem e cal hidratada) permaneceram abaixo do limite de detecção (<0,83 NMP/g.ST e 0,81 NMP/g.ST, respectivamente). Popova *et al.* (2014), Mora e Mejía (2024) não encontraram concentrações detectáveis de coliformes termotolerantes a partir do sétimo dia.

Ao final do período experimental de 30 dias, as concentrações de coliformes termotolerantes nos tratamentos com cal virgem e cal hidratada permaneceram abaixo

do limite de detecção do método, o que reitera a eficácia da estabilização alcalina na redução/inativação deste grupo microbiano. Adicionalmente, destaca-se que o critério estabelecido pela Resolução CONAMA 498/2020 para biossólido Classe A (< 10^3 NMP/g.ST) foi atingido por ambos os tratamentos já no terceiro dia experimental, mantendo-se a conformidade durante todo o período subsequente. Os níveis alcançados também atendem aos padrões internacionais para coliformes fecais estabelecidos por órgãos como a *U. S. Environmental Protection Agency* e a União Europeia (Diretiva 86/278/EEC), conforme detalhado no QUADRO 1, para biossólidos Classe A.

Os resultados encontrados corroboram com os achados de Popova *et al.* (2014), Lopes *et al.* (2020), Chaudhary e Gough (2021), Mora e Mejía (2024) para tratamento de lodo de esgoto doméstico por estabilização alcalina com utilização de cales, os quais também encontraram reduções logarítmicas significativas em suas experimentações, logo após a mistura do lodo com o agente alcalinizante, permitindo a caracterização dos materiais como biossólido, quanto a este parâmetro.

Há relatos na literatura sobre a eficácia da estabilização alcalina na eliminação de coliformes termotolerantes em lodos de esgoto mesmo com aplicação de doses de cal inferiores às utilizadas neste trabalho (Wong; Selvam, 2009; Popova *et al.*, 2014; Lopes *et al.*, 2020; Chaudhary; Gough, 2021).

Os valores de coliformes termotolerantes encontrados durante todo o experimento realizado na avaliação microbiológica estão no APÊNDICE 4 – tabelas dos valores de coliformes termotolerantes.

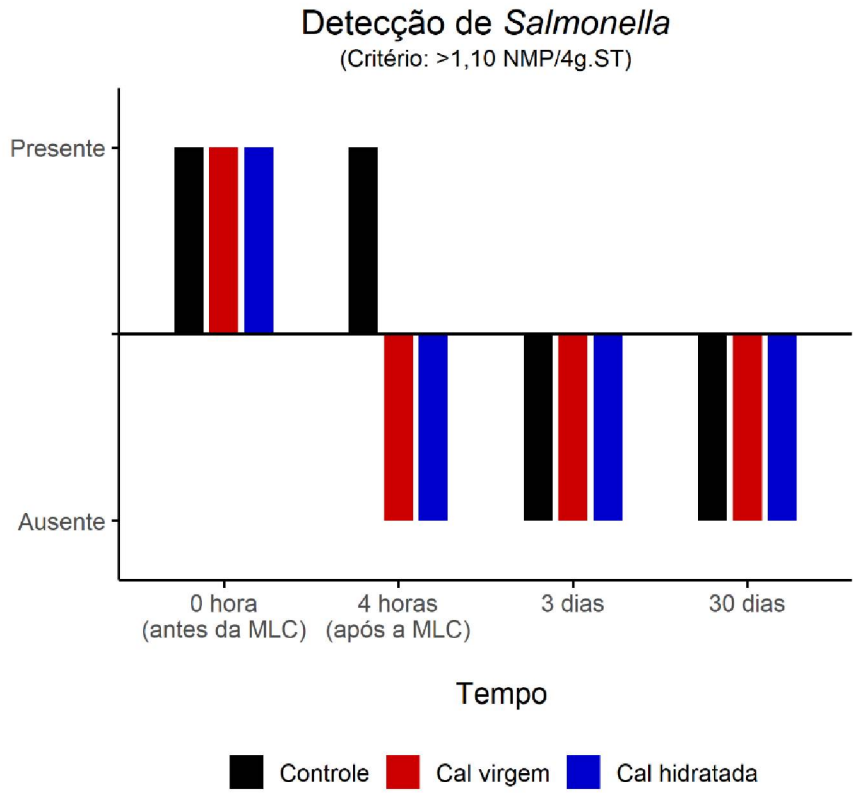
4.2.2 Salmonela spp

A presença de *Salmonella* spp. no lodo de esgoto representa um risco significativo à saúde pública, sendo este um dos principais patógenos bacterianos monitorados para garantir a segurança sanitária do biossólido destinado ao uso agrícola. Diferentemente de outros parâmetros a Resolução CONAMA 498/2020 não estabelece nenhum critério específico para *Salmonella* spp. em biossólidos. No entanto, regulamentações internacionais, como as da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) e da União Europeia (Diretiva 86/278/EEC), definem limites rigorosos, como > 3 NMP/4g.ST e de ausência em 25g de lodo, respectivamente, para biossólidos Classe A, conforme detalhado no QUADRO 1.

Neste estudo, a fim de avaliar a eficácia do tratamento na eliminação deste patógeno, o lodo bruto foi inoculado com *Salmonella* spp., resultando em uma concentração inicial (controle, dia 0) de 1,04 x 10^2 NMP/4g.ST, conforme mostra TABELA 15. Este valor, embora resultante de inoculação, situa-se em uma ordem de grandeza compatível com concentrações encontradas em alguns lodos de ETE's que tratam esgoto doméstico, conforme encontrado na TABELA 2, reportado por Gibbs *et al*. (1995), Lopes *et al*. (2020), e Cuetero-Martínez *et al*. (2023).

A FIGURA 29 ilustra a ausência/presença de *Salmonella* spp. detectáveis ao longo dos 30 dias de experimento para os tratamentos com cal virgem e cal hidratada e o controle. A TABELA 15 apresenta os resultados quantitativos (NMP/4g.ST) obtidos.

FIGURA 29 – PRESENÇA DE *SALMONELLA* SPP. AO LONGO DO PERÍODO EXPERIMENTAL



LEGENDA: MLC – Mistura lodo-cal.

NOTA: 0 (zero) hora representa o momento antes da mistura, pois como houve inoculação a presença de Salmonella é certa em ambos os tratamentos; 4 (quatro) horas representa o momento após a mistura e transporte das amostras para análise no laboratório.

FONTE: O Autor (2025).

De forma similar ao observado para coliformes termotolerantes (vide subitem 4.2.1), a aplicação de ambas as cales promoveu uma redução drástica e imediata na concentração de *Salmonella* spp. Conforme indicado na FIGURA 29 e detalhado na TABELA 15, já no dia 0, após a mistura e homogeneização (tempo considerado como 4 horas para fins de análise após transporte), a concentração em ambos os tratamentos (cal virgem e cal hidratada) caiu para níveis abaixo do limite de detecção do método utilizado (< 1,10 NMP/4g.ST).

Esta rápida inativação evidência a alta sensibilidade da *Salmonella* spp. às condições de pH elevado (acima de 12 no início do tratamento, conforme mostra TABELA 14) e, no caso da cal virgem, ao aumento de temperatura inicial. A combinação destes fatores causa danos letais à estrutura celular e aos processos metabólicos da bactéria. A eficácia da estabilização alcalina na eliminação de *Salmonella* é bem documentada na literatura. Mignotte-Cadiergues *et al.* (2001) registraram ausência de *Salmonella* após um dia de tratamento com 30% de cal (pH 10) em lodo a 23% de ST. Bina, Movahedian e Kord (2004) relataram ausência após 2 horas de tratamento alcalino em pH 12 e 11. Wong e Selvam (2009), tratando esterco suíno, com presença significativa de *Salmonella*, observaram decaimento superior a 5 Log_{10} UFC/g logo após a mistura (pH 12,4) e ausência na maioria das amostras após 4 dias. Lopes *et al.* (2020) relataram a não resistência de *Salmonella* após 2 horas de tratamento alcalino em lodo de UASB e de lodos ativados. Cuetero-Martínez *et al.* (2023) registraram redução de aproximadamente 4 Log_{10} NMP/g.ST após 2 horas de tratamento alcalino com uso de cal virgem e ambiente com pH maior que 12.

Ao longo dos 30 dias de monitoramento, as concentrações de *Salmonella* spp. nos tratamentos com cal virgem e cal hidratada permaneceram abaixo do limite de detecção (1,10 NMP/4g.ST), conforme detalhado na TABELA 15 e ilustrado na FIGURA 29. Este resultado demonstra o atendimento aos critérios internacionais, como os da *U. S. Environmental Protection Agency* (USEPA), para biossólidos Classe A, da Diretiva 86/278/EEC na União Europeia (EEC) e demais legislações conforme consta no QUADRO 1.

TABELA 15 - CONCENTRAÇÃO DE SALMONELLA SPP. NO EXPERIMENTO DE AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA

Tratamento	Dia	Salmonella spp. (NMP/4gST)
Controle	0	$1,04 \times 10^2$
	3	< LDM
	30	< LDM
Cal virgem	0	< LDM
	3	< LDM
	30	< LDM
Cal hidratada	0	< LDM
	3	< LDM
	30	< LDM

LEGENDA: LDM – Limite de Deteção do Método.

FONTE: O Autor (2025)

No tratamento controle (sem adição de cal), a concentração de *Salmonella* spp. também foi reduzida para níveis abaixo do limite de detecção já no terceiro de monitoramento, permanecendo assim até o final do experimento (dia 30). Este resultado sugere que, mesmo sem a elevação do pH proporcionada pela cal, as condições ambientais do experimento foram suficientes para inativar a Salmonella inoculada ao longo de poucos dias. No entanto, a estabilização alcalina garantiu essa eliminação de forma imediata.

Os resultados confirmam, portanto, que a estabilização alcalina com 30% de cal virgem ou cal hidratada é um processo eficaz para a eliminação de *Salmonella* spp. do lodo de esgoto anaeróbio, alcançando a inativação em poucas horas. O processo gera um biossólido que atende a padrões internacionais de segurança sanitária quanto a este patógeno, além de manter um ambiente com pH elevado que dificulta o seu eventual recrescimento.

4.2.3 Bacteriófagos

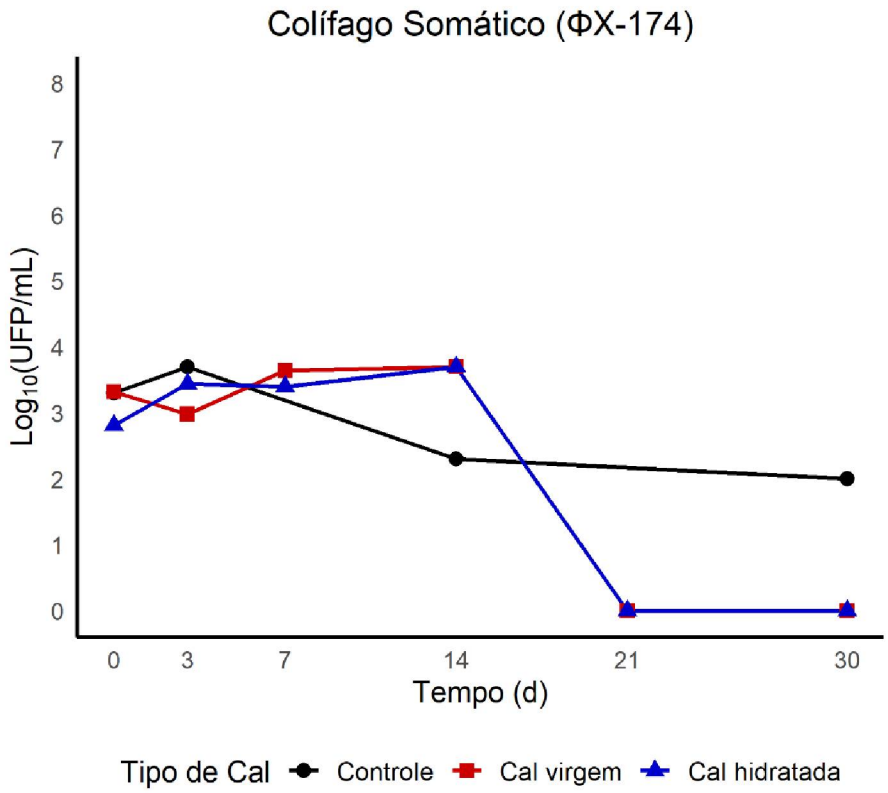
Os bacteriófagos, vírus que infectam bactérias, são frequentemente utilizados como indicadores virais no monitoramento ambiental e na avaliação de processos de tratamento de água e esgoto. Sua semelhança estrutural com enterovírus, alta resistência à inativação e métodos de quantificação simples e de baixo custo os tornam ferramentas valiosas para avaliar a eficácia de tratamentos sanitários (Toribio-

Avedillo *et al.*, 2021; Varbanov *et al.*, 2021). Neste estudo, o colifago somático ΦX-174 (hospedeiro *E. coli* ATCC 13706) foi inoculado no lodo bruto para avaliar a capacidade da estabilização alcalina em inativar partículas virais.

A análise do colifago somático ΦX-174 foi realizada em todas as amostras, exceto para as amostras controle do dia 7 e 21. O colífago foi detectado na maioria das amostras, exceto nos dias 21 e 30 dos tratamentos com cal virgem e cal hidratada.

A concentração inicial do colifago ΦX-174 no lodo inoculado, antes da adição da cal (dia 0), foi da ordem de 10^3 UFP/mL (Unidades Formadoras de Placa por mililitro). A FIGURA 30 apresenta a evolução da concentração de colifagos somáticos ao longo dos 30 dias de experimento para os tratamentos com cal virgem, cal hidratada e o controle. A TABELA 16 resume os dados quantitativos obtidos.

FIGURA 30 - DECAIMENTO DOS COLIFAGO SOMÁTICO DECAIMENTO NO LODO DE ESGOTO SOB PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO ALCALINA



FONTE: O Autor (2025).

TABELA 16 - COLIFAGOS SOMATICOS ENCONTRADOS NO EXPERIMENTO DA AVALIAÇÃO MICROBIOLÓGICA

Colifago Somático ΦX-174 (MSA) (UFP/mL)			
Dia	Controle	Cal virgem	Cal hidratada
0	$2{,}00 \times 10^3$	$2{,}10 \times 10^3$	$6{,}50 \times 10^2$
3	$5{,}00 \times 10^3$	$9{,}50 \times 10^2$	$2{,}70 \times 10^3$
7	NA	$4{,}40 \times 10^3$	$2{,}50 \times 10^3$
14	$2{,}00 \times 10^3$	$5{,}00 \times 10^3$	$5{,}00 \times 10^3$
21	NA	< LDM	0 (< LDM)
30	$1{,}00 \times 10^2$	< LDM	< LDM

LEGENDA: NA – não analisado; LDM – limite de detecção do método.

FONTE: O Autor (2025).

Observa-se um comportamento distinto para os colifagos em comparação com os indicadores bacterianos. No tratamento controle, a concentração de colifagos aumentou no terceiro dia (5000 UFP/mL), sugerindo possível replicação viral inicial ou liberação de partículas adsorvidas, seguida por um decaimento natural ao longo do tempo, atingindo 100 UFP/mL no dia 30. Este decaimento natural, embora presente, foi lento.

Nos tratamentos com cal, a dinâmica foi mais complexa. A cal hidratada apresentou uma concentração inicial mais baixa (650 UFP/mL no dia 0), seguida por um aumento expressivo até atingir pico de 5000 UFP/mL no dia 14. Similarmente, a cal virgem, após uma redução inicial no dia 3 (950 UFP/mL), também apresentou um aumento subsequente, atingindo um pico de 5000 UFP/mL no dia 14. Este aumento transitório nas concentrações de fagos detectáveis em ambos os tratamentos alcalinos pode ser atribuído a fatores como dificuldades na recuperação e detecção viral nos primeiros dias sob pH extremo, que pode mascarar a concentração real.

Apesar dessa dinâmica inicial, ambos os tratamentos com cal demonstraram eficácia na inativação completa dos colífago somáticos a longo prazo. Entre o dia 14 e o dia 21, ocorreu uma redução drástica, com as concentrações caindo para níveis abaixo do limite de detecção do método em ambos os tratamentos (cal virgem e cal hidratada). Essa condição de ausência detectável foi mantida até o final do experimento (dia 30). Dessa forma, os resultados alcançados pelo tratamento de estabilização alcalina a partir do dia 21 atendem ao critério da USEPA (1994) para presença restrita a > UFP/4g.ST de vírus entéricos, para obtenção de biossólido classe A conforme aponta QUADRO 1.

Outros estudos também apresentaram reduções e inativações de colifagos somáticos. Lopes *et al*. (2020), em experimentação de estabilização alcalina de lodo de UASB com pH acima de 12, apresentaram reduções de 2,5 Log_{10} UFP/g.ST para colifagos somáticos em 2 horas de tratamento, chegando a níveis abaixo do detectável após 24 horas. Hijikata *et al*. (2016) relataram inativação de colífagos a partir de pH 10 com adição de cal misturada a cinzas, com 1 hora de contato. Hansen, Warden e Margolin (2007) relataram a eficácia na redução de bacteriófagos, adenovírus e rotavírus logo após a adição da cal em uma matriz de lodo caleado a 22°C. Entretanto, em ambientes de compostagem, por exemplo, os colífagos foram inativados totalmente após 200 dias (El Hayany *et al*., 2021).

Em ambientes de pH elevado proporcionado pela adição de cal, a perda de infectividade do colífago pode ocorrer devido a danos ao capsídeo e à exteriorização do material genético (Hijikata *et al*., 2016). Nuanualsuwan e Cliver (2002) relatam que mudanças conformacionais no capsídeo induzidas pelo pH levam diretamente à perda de infectividade viral.

No presente estudo, a inativação dos bacteriófagos pela estabilização alcalina, embora eficaz, ocorreu de forma mais lenta do que a observada para as bactérias. Enquanto coliformes termotolerantes e *Salmonella* foram inativados em questão de horas ou poucos dias, a inativação completa dos colífagos só foi alcançada após aproximadamente três semanas. Este resultado corrobora a maior resistência das partículas virais a condições de pH elevado em comparação com bactérias, conforme pode ser observado no estudo de Lopes *et al*. (2020) e apontando na revisão de Martín-Díaz *et al*. (2020), onde se demonstra que colífagos somáticos apresentam maior resistência a tratamentos de lodo em comparação com *E.coli* e coliformes termotolerantes.

Portanto, embora a estabilização alcalina com 30% de cal seja capaz de inativar colifagos somáticos, o tempo necessário para atingir níveis seguros (< LDM) é consideravelmente maior do que para as bactérias. Este achado reforça a importância de incluir indicadores virais na avaliação de processos de higienização de lodo, pois a conformidade baseada apenas em indicadores bacterianos pode não garantir a eliminação adequada de vírus entéricos mais resistentes.

5 **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

5.1 CONCLUSÃO

Conclui-se que o processo de estabilização alcalina do lodo anaeróbio desaguado em centrífuga demonstrou viabilidade físico-química e microbiológica, especialmente com a aplicação de 30% de cal, seja virgem ou hidratada. Esta dosagem se mostrou adequada para promover a elevação do pH a níveis compatíveis com os critérios da Resolução CONAMA n° 498/2020 e com o processo de EAP adotado no Paraná, além de promover a redução efetiva dos indicadores bacterianos e virais avaliados neste estudo.

Embora nem todos os critérios normativos da Resolução CONAMA 498/2020 tenham sido plenamente atingidos, como a manutenção da temperatura mínima de 50°C por 12 horas e o teor de sólidos totais (ST) acima de 50%, ambos os parâmetros podem ser alcançados por estratégias complementares. A elevação de temperatura pode ser viabilizada por meio de processos térmicos combinados à estabilização alcalina, enquanto o incremento no ST pode ser obtido por técnicas de revolvimento do lodo durante o processo de cura.

Em relação aos critérios microbiológicos estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 498/2020 e por exigências internacionais, todas as doses avaliadas, incluindo a de 30%, foram eficazes para alcançar as reduções previstas nessas normativas. Observou-se que os patógenos bacterianos foram inativados rapidamente nos primeiros dias de tratamento, enquanto os indicadores virais apresentaram redução mais lenta, atingindo níveis satisfatórios apenas a partir do 21º dia.

Esse comportamento evidencia a resistência de partículas virais ao processo de estabilização alcalina e a importância de considerar os vírus entéricos como bioindicadores complementares de sanidade do lodo higienizado, em conjunto com os bioindicadores bacterianos. A Resolução CONAMA 498/2020 não estabelece a obrigatoriedade de monitoramento de indicadores virais. Logo, a conformidade baseada apenas em indicadores bacterianos pode subestimar o tempo necessário para garantir a segurança viral do biossólido, sendo crucial considerar a maior persistência dos vírus em ambientes com pH elevado para assegurar uma avaliação sanitária completa e a produção de um material seguro para destinação ou uso.

Quanto à determinação das doses de cal e dos períodos mínimos necessários para obtenção de biossólido Classe A, em processo de estabilização alcalina de lodo anaeróbio desaguado mecanicamente, conclui-se que a dose de 30% é recomendada como referência inicial, sendo suficiente para a manutenção da alcalinidade necessária e a redução efetiva de microrganismos bacterianos e virais, e que o período mínimo necessário de cura é de 21 dias, haja vista a necessidade de um período maior em relação aos bioindicadores virais. Doses superiores, como 40%, 50% ou acima de 50%, e períodos maiores podem ser considerados em contextos específicos que demandem incremento térmico adicional ou necessidade de maior tempo de pátio por questões logísticas, mas não se mostraram imprescindíveis nas condições deste estudo.

Após a repetição de estudos semelhantes, será possível definir as condições mínimas para redução de patógenos pelo processo de estabilização alcalina, apresentando o processo aos órgãos ambientais competentes, conforme estabelecem as alternativas 5 e 6 (lodo tratado em um processo equivalente a um processo de redução adicional de patógenos) da IN IAT 38/2025 e da Resolução CONAMA 498/2020.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se a condução de estudos em escala piloto ampliada ou plena para validar os resultados de pH e investigar estratégias que potencializem a elevação e retenção de temperatura com o uso de cal virgem, bem como a implementação de manejo de revolvimento para alcançar os teores de sólidos totais superiores a 50%, conforme exigido pelas normativas vigentes. A avaliação em maior escala também possibilitará uma análise mais abrangente do comportamento do processo em condições operacionais reais.

Sugere-se, ainda, a investigação de processos combinados ou complementares de secagem e higienização para garantir o pleno atendimento a todos os critérios normativos para produção de biossólido Classe A. Além da inoculação de ovos viáveis de helmintos para que seja possível avaliar a eficiência de inativação deste parâmetro.

REFERÊNCIAS

ALLIEVI, L. *et al.* Inactivation of fecal bacteria in sewage sludge by alkaline treatment. **Bioresource Technology**, v. 49, n. 1, p. 25–30, 1 jan. 1994.

ALOUINI, Z.; JEMLI, M. Destruction of helminth eggs by photosensitized porphyrin. **Journal of Environmental Monitoring**, v. 3, n. 5, p. 548–551, 2001.

ANDERSSON, K. *et al.* **Sanitation, Wastewater Management and Sustainability: from Waste Disposal to Resource Recovery**. Nairobi and Stockholm: United Nations Environment Programme and Stockholm Environment Institute, 2016.

ANDREOLI, C. V. *et al.* Part A: Sanitization and use of sewage sludge in soil Technical Note 4 - Sludge sanitization by alkaline stabilization. **Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 45–58, 2022.

ANDREOLI, C. V; PEGORINI, E. S; FERNANDES, F. Disposição do lodo no solo. *In*: ANDREOLI, C. V; VON SPERLING, M; FERNANDES, F. (Orgs.). **Lodo de esgoto: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG. v. 6 p. 317–395, 2014.

ANDREOLI, C. V. *et al.* Higienização do lodo de esgoto. *In*: ANDREOLI, C. V. (Org.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. 1. ed. Curitiba: Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB). p. 87–117, 2001.

APHA, American Public Health Association. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington, DC: APHA, AWWA, WEF, 2017.

BALASUNDARAM, G. *et al.* Mesophilic, thermophilic and thermal hydrolysis process coupled anaerobic digestion of sewage sludge: Biomethane potential, pathogen removal and energy feasibility. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 37, p. 101397, fev. 2024.

BINA, B.; MOVAHEDIAN, H.; KORD, I. The Effect of Lime Stabilization on the Microbiological Quality of Sewage Sludge. **Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering**. v. 1, n. 1, p. 34 – 38, 2004.

BITTENCOURT, S. **Gestão do processo de uso agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná: aplicabilidade da resolução CONAMA 375/06**. Tese—Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2014.

BITTENCOURT, S. *et al.* Part A: Sanitization and use of sewage sludge in soil Technical Note 2 - Legislation aspects. **Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 17–29, 2021.

BITTENCOURT, S. *et al.* Part A: Sanitization and use of sewage sludge in soil Technical Note 6 - Agricultural use of biosolids. **Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 75–87, 2022.

BITTENCOURT, S. **Uso de biossólidos no Brasil, perspectiva pós resolução CONAMA 498/2020**. *In*: São Paulo: Associação dos Engenheiros da Sabesp, 4 out. 2023.

BITTENCOURT, S.; AISSE, M. M.; SERRAT, B. M. Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 6, p. 1129–1139, dez. 2017.

BITTENCOURT, S.; ZILIOTTO, M. C. S. Characterization of Sewage Sludge Sanitized: A Case Study of the Parana State, Brazil, from 2014 to 2015. **Modern Environmental Science and Engineering**, v. 3, n. 12, p. 838–843, dez. 2017.

BORATTO, D. C.; VON SPERLING, M. Análise e comparação técnica e econômica de alternativas de processamento de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários para uso em solos. **Revista DAE**, v. 71, n. 240, p. 6–22, 18 abr. 2023.

BRASIL. **Lei n° 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Brasília, DF, 2010.

BRASIL. **Resolução CONAMA N° 498, de 19 de Agosto de 2020**. Brasília - DF, 2020.

BRASIL, Ministério das Cidades. **Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento: diagnóstico temático dos serviços de água e esgoto - 2022**. Brasília, 2022.

BUSS, W. Pyrolysis Solves the Issue of Organic Contaminants in Sewage Sludge while Retaining Carbon—Making the Case for Sewage Sludge Treatment via Pyrolysis. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 9, n. 30, p. 10048–10053, 2 ago. 2021.

CERQUEIRA, P. L. W.; BITTENCOURT, S.; AISSE, M. M. Proposta de dimensionamento de pátios de higienização de lodo de esgoto, por estabilização alcalina prolongada, com base em parâmetros operacionais. **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - 30° Congresso ABES 2019**, 2019.

CERQUEIRA, P. L. W.; AISSE, M. M. Custos de processamento de lodo em Estações de Tratamento de Esgoto com reatores anaeróbios de manto de lodo e pós-tratamento aeróbio: subsídios para Estudos de Concepção. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, n. 2, p. 251–262, abr. 2021.

CHAUDHARY, Y. K.; GOUGH, H. L. Identifying ranges of combined lime and heat treatments to achieve biosolids stabilization fecal coliform targets. **Journal of Environmental Management**, v. 282, p. 111900, 15 mar. 2021.

CIEŚLIK, B. M.; NAMIEŚNIK, J.; KONIECZKA, P. Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 1–15, mar. 2015.

COLDEBELLA, C. **Higienização alcalina de lodo de ETE de digestor anaeróbio em reator fechado**. Mestrado—Londrina: Universidade Estadual de Londrina, 2015.

COLLIVIGNARELLI, M. C. *et al.* Biosolids: What are the different types of reuse? **Journal of Cleaner Production**, v. 238, p. 117844, nov. 2019.

CUETERO-MARTÍNEZ, Y. *et al.* Removal of bacterial pathogens and antibiotic resistance bacteria by anaerobic sludge digestion with thermal hydrolysis pre-treatment and alkaline stabilization post-treatment. **Chemosphere**, v. 313, p. 137383, 1 fev. 2023.

DAHAB, M. F.; SURAMPALLI, R. Y. Effects of aerobic and anaerobic digestion systems on pathogen and pathogen indicator reduction in municipal sludge. **Water Science and Technology**, v. 46, n. 10, p. 181–187, 1 nov. 2002.

DE FARIA, M. F. *et al.* Survival of thermotolerant coliforms in municipal biosolids after application in tropical soil cultivated with Eucalyptus. **Journal of Environmental Management**, v. 274, p. 111116, nov. 2020.

DE-39316S. **Reglamento para el manejo y disposición final de lodos y biosólidos.** San José, Costa Rica, 2015.

DECREY, L.; KAZAMA, S.; KOHN, T. Ammonia as an *In Situ* Sanitizer: Influence of Virus Genome Type on Inactivation. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 82, n. 16, p. 4909–4920, 15 ago. 2016.

EEC, European Economic Community. **Council Directive of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, When dewage sludge**. 86/278. v. 12, 1986.

EL HAYANY, B. *et al.* Fate of pathogenic microorganisms during lagooning sludge composting and exploration of bacteriophages as indicator of hygienization. **Environmental Technology & Innovation**, v. 21, p. 101268, fev. 2021.

EMBRAPA. **Manual de métodos e análises de solo**. 3. ed. Brasília, DF, 2017.

FISHER, R. M.; ALVAREZ-GAITAN, J. P.; STUETZ, R. M. Review of the effects of wastewater biosolids stabilization processes on odor emissions. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 17, p. 1515–1586, 2 set. 2019.

GANTZER, C. *et al.* Monitoring of bacterial and parasitological contamination during various treatment of sludge. **Water Research**, v. 35, n. 16, p. 3763–3770, nov. 2001.

GERBA, C. P.; SMITH, J. E. Sources of Pathogenic Microorganisms and Their Fate during Land Application of Wastes. **Journal of Environmental Quality**, v. 34, n. 1, p. 42–48, jan. 2005.

GHOLIPOUR, S. *et al.* Occurrence of viruses in sewage sludge: A systematic review. **Science of The Total Environment**, v. 824, p. 153886, jun. 2022.

GIBBS, R. A. *et al.* Pathogen die-off in stored wastewater sludge. **Water Science and Technology**, v. 31, n. 5–6, p. 91–95, 1 mar. 1995.

GODINHO, V. M. **Estudo sobre a ocorrência de ovos de helmintos e viabilidade de áscaris spp. em lodo anaeróbio in natura e submetidos à higienização por caleação e por tratamento térmico**. Dissertação—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2003.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; VON SPERLING, M. Remoção da umidade de lodos de esgoto. *In*: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Orgs.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG. v. 6 p. 157–258, 2014.

GONZÁLEZ-TOLIVIA, E. *et al.* BOF slag as a new alkalizing agent for the stabilization of sewage sludge. **Waste Management**, v. 153, p. 335–346, 1 nov. 2022.

HANSEN, J. J.; WARDEN, P. S.; MARGOLIN, A. B. Inactivation of Adenovirus Type 5, Rotavirus WA and Male Specific Coliphage (MS2) in Biosolids by Lime Stabilization. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 4, n. 1, p. 61–67, 31 mar. 2007.

HE, X. Q. *et al.* One-year monthly survey of rotavirus, astrovirus and norovirus in three sewage treatment plants (STPs) in Beijing, China and associated health risk assessment. **Water Science and Technology**, v. 64, n. 6, p. 1202–1210, 1 set. 2011.

HIJIKATA, N. *et al.* Bactericidal and virucidal mechanisms in the alkaline disinfection of compost using calcium lime and ash. **Journal of Environmental Management**, v. 181, p. 721–727, out. 2016.

IAT, Instituto Agua e Terra. **Instrução normativa n° 38, de 28 de abril de 2025**. Paraná Governo do Estado, 2025.

INMET, Instituto Nacional DE Meteorologia. *Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa – BDMEP*. **Dados de precipitação e temperatura referentes aos anos de 2024 e 2025**. Disponível em: https://bdmep.inmet.gov.br/. Acesso em: 21 ago. 2025.

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 10705-2:2000: Water quality — Detection and enumeration of bacteriophages — Part 2: Enumeration of somatic coliphages**. Geneva, 2000.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 8. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2017.

KITTIGUL, L. *et al.* Occurrence of noroviruses in recycled water and sewage sludge: emergence of recombinant norovirus strains. **Journal of Applied Microbiology**, v. 126, n. 4, p. 1290–1301, 18 abr. 2019.

KITTIGUL, L.; POMBUBPA, K. Rotavirus Surveillance in Tap Water, Recycled Water, and Sewage Sludge in Thailand: A Longitudinal Study, 2007–2018. **Food and Environmental Virology**, v. 13, n. 1, p. 53–63, 31 mar. 2021.

KUK, T. N. *et al.* Proposta de sistema térmico de higienização e secagem de lodo em escala plena para uma estação anaeróbia de tratamento de esgoto de pequeno porte. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, n. 2, p. 291–303, abr. 2022.

LE CANN, P. *et al.* Quantification of human astroviruses in sewage using real-time RT-PCR. **Research in Microbiology**, v. 155, n. 1, p. 11–15, jan. 2004.

LELES, D. *et al.* Are Ascaris lumbricoides and Ascaris suum a single species? **Parasites & Vectors**, v. 5, n. 1, p. 42, 20 dez. 2012.

LI, H. *et al.* Effects and model of alkaline waste activated sludge treatment. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 11, p. 5140–5144, 1 jul. 2008.

LI, P. *et al.* A review on anaerobic co-digestion of sewage sludge with other organic wastes for methane production: Mechanism, process, improvement and industrial application. **Biomass and Bioenergy**, v. 185, p. 107241, 1 jun. 2024.

LOPES, B. C. *et al.* Effect of alkaline treatment on pathogens, bacterial community and antibiotic resistance genes in different sewage sludges for potencial agriculture use. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 41, n. 4, p. 529–538, 10 fev. 2020.

LUDUVICE, M. Processos de estabilização de lodos. *In*: ANDREOLI, Cleverson Vitório; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fernando (Orgs.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG. v. 6 p. 121–155, 2014.

MADER NETTO, O. S. *et al.* **Estudos das variações de pH no lodo caleado em função de diferentes dosagens de óxido de cálcio e teores de umidade**. *In*: Joinville: 14 set. 2003.

MAGRI, M. E. *et al.* Inactivation of adenovirus, reovirus and bacteriophages in fecal sludge by pH and ammonia. **Science of The Total Environment**, v. 520, p. 213–221, jul. 2015.

MAROUANI, E. *et al.* Short-Term Effects of Biosolid Application on Two Mediterranean Agricultural Soils and Durum Wheat Yield. **Agronomy**, v. 11, n. 4, p. 709, 8 abr. 2021.

MARTÍN-DÍAZ, J. *et al.* Review: Indicator bacteriophages in sludge, biosolids, sediments and soils. **Environmental Research**, v. 182, p. 109133, mar. 2020.

MARZBALI, M. H. *et al.* A critical review on emerging industrial applications of chars from thermal treatment of biosolids. **Journal of Environmental Management**, v. 369, p. 122341, out. 2024.

MCKINLEY, J. W.; PARZEN, R. E.; MERCADO GUZMÁN, A. Ammonia Inactivation of Ascaris Ova in Ecological Compost by Using Urine and Ash. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 78, n. 15, p. 5133–5137, ago. 2012.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery**. 5th Edition ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2014.

MIGNOTTE-CADIERGUES, B. *et al.* The effect of liming on the microbiological quality of urban sludge. **Water Science and Technology**, v. 43, n. 12, p. 195–200, 1 jun. 2001.

MONJE, V. *et al.* Assessment of alkaline stabilization processes in industrial waste streams using a model-based approach. **Journal of Environmental Management**, v. 293, p. 112806, set. 2021.

MORA, E. C.; MEJÍA, R. C. Evaluación técnica, financiera y ambiental de la higienización alcalina del lodo de aguas residuales ordinarias para su transformación en biosólido. **Revista de Ciencias Ambientales**, v. 59, n. 1, p. 1–25, 20 set. 2024.

MORACE, G. *et al.* Microbial quality of wastewater: detection of hepatitis A virus by reverse transcriptase-polymerase chain reaction. **Journal of Applied Microbiology**, v. 92, n. 5, p. 828–836, maio 2002.

NELSON, K. L.; DARBY, J. L. Determination of the Inactivation Rate of *Ascaris* Eggs in Wastewater Stabilization Pond Sludge Using Dialysis Chambers and Sludge Cores. **Water Environment Research**, v. 74, n. 4, p. 362–369, jul. 2002.

NORDIN, A. **Ammonia Sanitisation of Human Excreta**. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 2010.

NUANUALSUWAN, S.; CLIVER, D. O. Pretreatment to avoid positive RT-PCR results with inactivated viruses. **Journal of Virological Methods**, v. 104, n. 2, p. 217–225, jul. 2002.

NYLEN, J.; SHEEHAN, M. Review of the Integration of Drying and Thermal Treatment Processes for Energy Efficient Reduction of Contaminants and Beneficial Reuse of Wastewater Treatment Plant Biosolids. **Energies**, v. 16, n. 4, p. 1964, 16 fev. 2023.

OLUDAIRO, O. O. *et al.* Ecology and epidemiology of Salmonella spp. isolated from the environment and the roles played by wild animals in their maintenance. **International Journal of One Health**, p. 1–9, 22 fev. 2023.

PARANÁ, Instituto Agua e Terra. **Resolução SEMA n° 21, de 22 de abril de 2009**. Curitiba, 2009.

PARK, S. *et al.* Mathematical models and bacterial communities for ammonia toxicity in mesophilic anaerobes not acclimated to high concentrations of ammonia. **Water Science and Technology**, v. 74, n. 4, p. 935–942, 17 ago. 2016.

PECSON, B. M. *et al.* The effects of temperature, pH, and ammonia concentration on the inactivation of Ascaris eggs in sewage sludge. **Water Research**, v. 41, n. 13, p. 2893–2902, 1 jul. 2007.

PECSON, B. M.; NELSON, K. L. Inactivation of Ascaris suum eggs by ammonia. **Environmental Science and Technology**, v. 39, n. 20, p. 7909–7914, 15 out. 2005.

PEGORINI, E. S. *et al.* **Aperfeiçoamento do processo de higienização através da caleação: II Potencial de alcalinização prolongada**. *In*: Fortaleza: ABES, 1 set. 2006a.

PEGORINI, E. S. *et al.* Aperfeiçoamento do processo de higienização através da caleação: II Potencial de Alcalinização Prolongada. **VIII Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - SIBESA**, 2006b.

PEPPER, I. L.; BROOKS, J. P.; GERBA, C. P. Pathogens in Biosolids. **Advances in Agronomy**, v. 90 p. 1–41, 2006.

PINTO, M. T. Higienização de lodos. *In*: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Orgs.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG. v. 6 p. 259–295, 2014.

POMPEO, R. P. **Influência da estocagem prolongada de lodos de esgoto, em diferentes condições operacionais, na redução de patógenos, visando reciclagem agrícola**. Tese—Curitiba: UFPR, 2015.

POMPEO, R. P. *et al.* Influence of Long-Term Storage Operating Conditions on the Reduction of Viable Ascaris Eggs in Sewage Sludge for Agricultural Reuse. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 227, n. 5, p. 144, 16 maio 2016.

POPOVA, T. P. *et al.* Decontamination of sewage sludge by treatment with calcium oxide. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 3, n. 9, p. 184 – 192, 2014.

RAMES, E. *et al.* Technical aspects of using human adenovirus as a viral water quality indicator. **Water Research**, v. 96, p. 308–326, jun. 2016.

RIBEIRO, M. E. *et al.* Aplicação de biossólido de ETE na produção de girassol como recuperação sustentável de recursos. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 17, p. e12922, 17 dez. 2024.

RIETOW, J. C. **Secagem e higienização térmica do lodo de esgoto utilizando o biogás produzido em reatores UASB**. Tese—Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2024.

ROCHA, A. L. C. L. **Higienização de lodo anaeróbio de esgoto por meio alcalino estudo de caso da ETE Lages - Aparecida de Goiânia - GO**. Mestrado—Goiânia: Universidade Federal de Goias (UFG), 2009.

ROMANOS, D. *et al.* Assessing the quality of sewage sludge as an agricultural soil amendment in Mediterranean habitats. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 8, n. S1, p. 377–383, 3 dez. 2019.

SALIU, T. D. *et al.* PFAS profiles in biosolids, composts, and chemical fertilizers intended for agricultural land application in Quebec (Canada). **Journal of Hazardous Materials**, v. 480, p. 136170, dez. 2024.

SANEPAR, Companhia de Saneamento do Paraná. **Unidades de Gerenciamento de Lodo do Estado do Paraná**. Curitiba. 1 fotografia, 2025.

SANGUINETTI, G. S. *et al.* Investigating helminth eggs and Salmonella sp. in stabilization ponds treating septage. **Water Science and Technology**, v. 51, n. 12, p. 239–247, 1 jun. 2005.

SCHNELL, M.; HORST, T.; QUICKER, P. Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 263, p. 110367, jun. 2020.

SEIPLE, T. E.; COLEMAN, A. M.; SKAGGS, R. L. Municipal wastewater sludge as a sustainable bioresource in the United States. **Journal of Environmental Management**, v. 197, p. 673–680, 15 jul. 2017.

SEMANART, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. **Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección Ambiental. Lodo y biosólidos. Especificaciones y limites máximos permisibles de contaminantes para su aprocechamiento y disposición final**. Ciudad de México, 2003

SIDHU, J.; TOZE, S. Human pathogens and their indicators in biosolids: A literature review. **Environment International**, v. 35, n. 1, p. 187–201, jan. 2009.

SILVA, L. C. F. da *et al.* Urban sewage sludge stabilization by alkalization-composting-vermicomposting process: Crop-livestock residue use. **PLOS ONE**, v. 18, n. 9, p. e0289362, 7 set. 2023.

SILVA, S. M. C. P. da *et al.* Main contaminants in sludge. *In*: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Orgs.). **Sludge Treatment and Disposal**. London - New York: IWA Publishing. v. 6 p. 31–47, 2007.

SILVA, S. M. C. P. da *et al.* Principais contaminantes do lodo. *In*: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M; FERNANDES, F. (Orgs.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG. v. 6 p. 67–119, 2014.

SOUZA, M. E. de *et al.* **Verificação da Longevidade do Processo de Caleação após a Estocagem Alcalina Prolongada de Lodo de Esgoto**. *In*: Bento Gonçalves: 10 abr. 2018.

THOMA, E. D. *et al.* Pyrolysis processing of PFAS-impacted biosolids, a pilot study. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 72, n. 4, p. 309–318, 3 abr. 2022.

TORIBIO-AVEDILLO, D. *et al.* Bacteriophages as Fecal Pollution Indicators. **Viruses**, v. 13, n. 6, p. 1089, 7 jun. 2021.

TOZZOLI, R. *et al.* Pathogenic *Escherichia coli* and enteric viruses in biosolids and related top soil improvers in Italy. **Journal of Applied Microbiology**, v. 122, n. 1, p. 239–247, jan. 2017.

US EPA, United States Environmental Protection Agency. **A plain English guide to the EPA part 503 biossolids rule**. Washington, DCOffice of Wastewater management, 1994.

USEPA, U. S. Environmental Protection Agency. **Method 1681: Fecal Coliforms in Sewage Sludge (Biosolids) by Multiple-Tube Fermentation using A-1 medium**. Washington, DC, 2006a.

USEPA, U. S. Environmental Protection Agency. **Method 1682: Salmonella in Sewage Sludge (Biosolids) by Modified Semisolid Rappaport-Vassiliadis (MSRV) Medium**. Washington, DC, 2006b.

USEPA, United States Environmental Protection Agency. **Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge (Including Domestic Septage) Under 40 CFR Part 503**. Washington, DC, 2003.

USEPA, United States Environmental Protection Agency. **Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge**. Washington DC, 2023.

VAITHYANATHAN, V. K.; CABANA, H. Integrated Biotechnology Management of Biosolids: Sustainable Ways to Produce Value—Added Products. **Frontiers in Water**, v. 3, 22 out. 2021.

VAN HAANDEL, A.; ALÉM SOBRINHO, P. Produção, composição e constituição de lodo de esgoto. *In*: ANDREOLI, Cleverson Vitorino (Org.). **Biossólidos - alternativas de uso de resíduos de saneamento**. Rio de Janeiro: Projeto PROSAB. ABES/RJ. p. 29–48, 2006.

VARBANOV, M. *et al.* Somatic coliphages are conservative indicators of SARS-CoV-2 inactivation during heat and alkaline pH treatments. **Science of The Total Environment**, v. 797, p. 149112, nov. 2021.

VON SPERLING, M. *et al.* Evaluation and modelling of helminth eggs removal in baffled and unbaffled ponds treating anaerobic effluent. **Water Science and Technology**, v. 48, n. 2, p. 113–120, 1 jul. 2003.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG. v. 1, 2014.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. 2. ed. Minas Gerais: UFMG. v. 2, 2016.

VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V. Introdução. *In*: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M; FERNANDES, F. (Orgs.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG. v. 6 p. 11–14, 2014.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgoto: características e produção. *In*: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M; FERNANDES, F. (Orgs.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG. v. 6 p. 15–65, 2014.

W.D., C. U. *et al.* Fate and distribution of heavy metals during thermal processing of sewage sludge. **Fuel**, v. 226, p. 721–744, ago. 2018.

WHARTON, D. A. The production and functional morphology of helminth egg-shells. **Parasitology**, v. 86, n. 4, p. 85–97, 6 abr. 1983.

WHO, World Health Organization. **Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater: Volume IV - Excreta and Greywater Use in Agriculture**. Genebra: World Health Organization. v. 4, 2022.

WILK, M.; ŚLIZ, M.; LUBIENIECKI, B. Hydrothermal co-carbonization of sewage sludge and fuel additives: Combustion performance of hydrochar. **Renewable Energy**, v. 178, p. 1046–1056, nov. 2021.

WONG, J. W. C.; SELVAM, A. Reduction of indicator and pathogenic microorganisms in pig manure through fly ash and lime addition during alkaline stabilization. **Journal of Hazardous Materials**, v. 169, n. 1–3, p. 882–889, 30 set. 2009.

XING, L. *et al.* Comparison of Dewatering Effects of Chemical Conditioning Method for Thermophilic and Mesophilic Anaerobic Digested Sewages Sludge. **Journal of Environmental Engineering**, v. 149, n. 10, out. 2023.

YANG, W. *et al.* Implications for assessing sludge hygienization: Differential responses of the bacterial community, human pathogenic bacteria, and fecal indicator bacteria to sludge pretreatment-anaerobic digestion. **Journal of Hazardous Materials**, v. 443, p. 130110, 5 fev. 2023.

ZHAN, J. *et al.* Potential pathogenic microorganisms in rural wastewater treatment process: Succession characteristics, concentration variation, source exploration, and risk assessment. **Water Research**, v. 254, p. 121359, maio 2024.

ZHANG, B. *et al.* A systematic review on nitrogen control during hydrothermal carbonization of sewage sludge under PRISMA guidelines. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 186, p. 106965, mar. 2025.

APÊNDICE 1 – TABELAS DOS VALORES DE PH

TEMPO	TRATAMENTO 01 - 0% DE CAL VIRGEM		
	EA-01-CV	EA-02-CV	EA-03-CV
T 0 dia	7,67	7,96	7,97
T 1dia	8,00	8,09	8,01
T 2 dia	8,18	8,09	8,11
T 3 dia	8,17	8,11	8,05
T 9 dia	8,17	8,13	8,06
T 12 dia	8,09	8,11	7,98
T 15 dia	7,05	6,87	7,20
T 20 dia	6,47	7,24	6,46
T 25 dia	5,68	6,46	6,60
T 30 dia	4,36	4,94	6,15

TEMPO	TRATAMENTO 02 - 30% DE CAL VIRGEM		
	EA-31-CV	EA-32-CV	EA-33-CV
T 0 dia	12,18	12,16	12,18
T 1dia	12,49	12,56	12,48
T 2 dia	12,48	12,35	12,58
T 3 dia	12,51	12,54	12,53
T 9 dia	12,38	12,44	12,54
T 12 dia	12,80	12,72	12,80
T 15 dia	12,50	12,47	12,44
T 20 dia	12,28	12,32	12,37
T 25 dia	12,54	12,64	12,50
T 30 dia	12,56	12,48	12,60

TEMPO	TRATAMENTO 03 - 40% DE CAL VIRGEM		
	EA-41-CV	EA-42-CV	EA-43-CV
T 0 dia	12,16	12,15	12,13
T 1dia	12,52	12,55	12,40
T 2 dia	12,51	12,51	12,37
T 3 dia	12,57	12,52	12,54
T 9 dia	12,54	12,55	12,64

T 12 dia	12,80	12,64	12,73
T 15 dia	12,50	12,55	12,46
T 20 dia	12,24	12,44	12,47
T 25 dia	12,54	12,64	12,63
T 30 dia	12,51	12,64	12,63

TEMPO	TRATAMENTO 04 - 50% DE CAL VIRGEM		
	EA-51-CV	EA-52-CV	EA-53-CV
T 0 dia	12,18	12,13	12,14
T 1dia	12,52	12,54	12,56
T 2 dia	12,62	12,61	12,65
T 3 dia	12,56	12,48	12,55
T 9 dia	12,71	12,73	12,59
T 12 dia	12,78	12,75	12,74
T 15 dia	12,53	12,49	12,51
T 20 dia	12,50	12,45	12,48
T 25 dia	12,67	12,65	12,63
T 30 dia	12,71	12,64	12,66

TEMPO	TRATAMENTO 01 - 0% DE CAL HIDRATADA		
	EA-01-CH	EA-02-CH	EA-03-CH
T 0 dia	7,85	7,46	7,32
T 1dia	7,27	7,39	7,33
T 2 dia	7,79	7,79	7,74
T 3 dia	7,83	7,54	7,80
T 9 dia	7,68	7,38	7,54
T 12 dia	7,25	7,21	7,16
T 15 dia	6,97	6,82	6,96
T 20 dia	6,02	6,19	6,91
T 25 dia	5,89	5,94	6,07
T 30 dia	5,07	4,88	5,71

TEMPO	TRATAMENTO 02 - 30% DE CAL HIDRATADA

	EA-31-CH	EA-32-CH	EA-33-CH
T 0 dia	12,31	12,33	12,32
T 1dia	12,44	12,53	12,52
T 2 dia	12,50	12,57	12,56
T 3 dia	12,73	12,73	12,67
T 9 dia	12,46	12,46	12,46
T 12 dia	12,51	12,53	12,51
T 15 dia	12,60	12,58	12,59
T 20 dia	12,21	12,30	12,25
T 25 dia	12,08	12,11	12,14
T 30 dia	12,39	12,49	12,38

TEMPO	TRATAMENTO 03 - 40% DE CAL HIDRATADA		
	EA-41-CH	EA-42-CH	EA-43-CH
T 0 dia	12,31	12,27	12,29
T 1dia	12,57	12,50	12,59
T 2 dia	12,48	12,55	12,58
T 3 dia	12,75	12,74	12,74
T 9 dia	12,48	12,48	12,47
T 12 dia	12,55	12,59	12,60
T 15 dia	12,63	12,61	12,60
T 20 dia	12,20	12,23	12,30
T 25 dia	12,16	12,19	12,20
T 30 dia	12,49	12,50	12,49

TEMPO	TRATAMENTO 04 - 50% DE CAL HIDRATADA		
	EA-51-CH	EA-52-CH	EA-53-CH
T 0 dia	12,27	12,32	12,32
T 1dia	12,60	12,62	12,60
T 2 dia	12,58	12,56	12,59
T 3 dia	12,75	12,78	12,79
T 9 dia	12,47	12,54	12,51
T 12 dia	12,57	12,55	12,54

T 15 dia	12,64	12,64	12,54
T 20 dia	12,32	12,31	12,30
T 25 dia	12,25	12,28	12,24
T 30 dia	12,56	12,52	12,53

APÊNDICE 2 – TABELAS DOS VALORES DE SÓLIDOS TOTAIS

TEMPO	CONTROLE - 0% DE CAL VIRGEM		
	EA-01-CV	EA-02-CV	EA-03-CV
T 0 dia	21,99	21,86	22,40
T 1dia	23,27	22,55	23,01
T 2 dia	23,09	22,38	22,54
T 3 dia	24,95	22,15	23,61
T 9 dia	22,77	22,50	21,89
T 12 dia	24,88	24,88	24,21
T 15 dia	23,43	22,16	25,61
T 20 dia	23,65	24,79	23,62
T 25 dia	26,09	27,36	26,15
T 30 dia	28,78	27,73	26,04

TEMPO	TRATAMENTO 02 - 30% DE CAL VIRGEM		
	EA-31-CV	EA-32-CV	EA-33-CV
T 0 dia	30,01	29,96	30,18
T 1dia	32,05	28,14	31,26
T 2 dia	31,00	32,16	32,17
T 3 dia	33,06	34,04	33,80
T 9 dia	32,31	30,18	31,45
T 12 dia	35,94	33,42	37,52
T 15 dia	36,68	34,94	32,45
T 20 dia	39,17	37,24	41,63
T 25 dia	32,88	39,48	40,68
T 30 dia	39,04	34,14	37,61

TEMPO	TRATAMENTO 02 - 40% DE CAL VIRGEM		
	EA-41-CV	EA-42-CV	EA-43-CV
T 0 dia	29,97	29,75	30,10
T 1dia	32,60	31,86	31,57

T 2 dia	32,76	32,09	31,71
T 3 dia	36,68	31,59	33,28
T 9 dia	34,07	32,00	32,74
T 12 dia	38,29	38,16	37,54
T 15 dia	37,11	37,34	37,56
T 20 dia	41,24	36,03	37,45
T 25 dia	34,24	34,02	35,87
T 30 dia	36,71	36,64	39,34

TEMPO	TRATAMENTO 03 - 50% DE CAL VIRGEM		
	EA-51-CV	EA-52-CV	EA-53-CV
T 0 dia	31,94	32,31	32,31
T 1dia	34,15	33,46	34,45
T 2 dia	34,89	35,87	34,41
T 3 dia	35,10	34,86	35,81
T 9 dia	34,03	37,86	35,57
T 12 dia	41,09	37,89	40,68
T 15 dia	39,54	41,29	39,10
T 20 dia	39,11	44,27	40,76
T 25 dia	37,31	37,43	37,02
T 30 dia	40,71	42,52	40,09

TEMPO	CONTROLE - 0% DE CAL HIDRATADA		
	EA-01-CH	EA-02-CH	EA-03-CH
T 0 dia	26,19	25,98	25,46
T 1dia	23,53	25,85	24,87
T 2 dia	23,91	27,52	25,40
T 3 dia	29,33	25,04	26,17
T 9 dia	25,97	26,26	25,45
T 12 dia	29,27	28,75	29,18
T 15 dia	30,38	29,29	30,82
T 20 dia	30,29	30,58	30,45
T 25 dia	28,85	34,16	32,37
T 30 dia	33,71	34,34	35,89

TEMPO	TRATAMENTO 01 - 30% DE CAL HIDRATADA		
	EA-31-CH	EA-32-CH	EA-33-CH
T 0 dia	28,72	28,75	28,81
T 1dia	29,13	29,32	29,86
T 2 dia	30,66	31,38	30,09
T 3 dia	31,62	31,59	32,47
T 9 dia	32,35	35,98	40,77
T 12 dia	34,24	33,28	35,04
T 15 dia	36,82	34,10	36,29
T 20 dia	37,61	33,91	33,54
T 25 dia	34,24	33,28	35,04
T 30 dia	37,61	33,91	33,54

TEMPO	TRATAMENTO 02 - 40% DE CAL HIDRATADA		
	EA-41-CH	EA-42-CH	EA-43-CH
T 0 dia	29,39	29,70	29,86
T 1dia	29,79	30,46	30,97
T 2 dia	31,69	31,66	31,97
T 3 dia	33,70	32,74	32,89
T 9 dia	33,90	35,58	34,02
T 12 dia	36,71	36,26	36,50
T 15 dia	39,54	37,63	38,01
T 20 dia	38,69	38,87	38,19
T 25 dia	38,12	39,35	39,17
T 30 dia	39,43	39,27	37,96

TEMPO	TRATAMENTO 03 - 50% DE CAL HIDRATADA		
	EA-51-CH	EA-52-CH	EA-53-CH
T 0 dia	31,73	31,69	31,29
T 1dia	31,94	32,46	32,68

T 2 dia	33,27	33,70	33,46
T 3 dia	36,80	33,17	35,99
T 9 dia	37,29	37,70	37,99
T 12 dia	37,54	37,81	37,92
T 15 dia	41,76	42,62	42,05
T 20 dia	40,26	38,46	40,29
T 25 dia	40,26	38,46	40,29
T 30 dia	39,45	39,31	39,97

APÊNDICE 3 – TABELAS DOS VALORES DE TEMPERATURA

Tempo (minutos)	Controle Termômetro 1	30% cal virgem Termômetro 2	40% cal virgem Termômetro 3	50% cal virgem Termômetro 4
0	27,60	36,52	38,55	39,17
2	27,57	36,52	38,94	40,79
4	27,49	36,47	39,11	41,05
6	27,47	36,42	39,21	41,15
8	27,45	36,37	39,29	41,22
10	27,49	36,36	39,37	41,27
12	27,49	36,30	39,36	41,19
14	27,48	36,23	39,36	41,18
16	27,55	36,17	39,35	41,15
18	27,57	36,11	39,32	41,12
20	27,51	35,99	39,26	41,08
22	27,64	36,03	39,32	41,12
24	27,77	36,09	39,33	41,07
26	27,73	35,98	39,26	41,03
28	27,84	36,03	39,30	41,04
30	27,65	35,82	39,21	41,04
32	27,93	36,00	39,32	41,07
34	28,09	36,09	39,37	41,08
36	28,05	35,99	39,27	40,98
38	28,17	36,06	39,36	41,05
40	27,81	35,70	39,16	40,99
42	27,82	35,65	39,11	40,93
44	27,89	35,67	39,15	40,96
46	27,86	35,58	39,06	40,85
48	27,69	35,39	38,93	40,75
50	27,73	35,36	38,92	40,73
52	27,60	35,22	38,87	40,73
54	27,81	35,36	38,95	40,74
56	28,06	35,53	39,03	40,73
58	27,87	35,32	38,92	40,68
60	27,95	35,34	38,95	40,69
62	28,08	35,39	38,90	40,53
64	27,97	35,25	38,80	40,46
66	28,07	35,30	38,87	40,50
68	28,03	35,21	38,85	40,52
70	28,11	35,23	38,79	40,36
72	28,07	35,15	38,75	40,33
74	28,10	35,13	38,70	40,23
76	27,78	34,81	38,51	40,11
78	28,03	34,98	38,57	40,06
80	27,95	34,88	38,51	40,00
82	27,97	34,85	38,50	39,97
84	27,97	34,80	38,39	39,77

86	27,86	34,66	38,30	39,70
88	27,77	34,57	38,29	39,74
90	27,73	34,50	38,25	39,68
92	27,63	34,39	38,17	39,58
94	27,77	34,46	38,14	39,45
96	27,52	34,18	37,91	39,24
98	27,64	34,28	38,04	39,37
100	27,68	34,26	37,99	39,26
102	27,45	34,03	37,83	39,13
104	27,47	34,02	37,79	39,05
106	27,61	34,09	37,82	39,00
108	27,33	33,82	37,68	38,96
110	27,23	33,69	37,56	38,83
112	27,05	33,50	37,45	38,77
114	27,26	33,65	37,53	38,78
116	27,22	33,59	37,48	38,71
118	27,40	33,69	37,47	38,58
120	27,21	33,50	37,32	38,47
122	27,21	33,44	37,23	38,33
124	27,20	33,41	37,25	38,36
126	27,14	33,32	37,20	38,32
128	27,01	33,17	37,04	38,16
130	27,00	33,12	36,99	38,09
132	27,07	33,15	37,01	38,11
134	26,98	33,01	36,87	37,96
136	27,05	33,05	36,92	37,98
138	27,18	33,12	36,93	37,96
140	26,93	32,86	36,76	37,84
142	27,22	33,07	36,86	37,83
144	27,12	32,95	36,76	37,76
146	26,89	32,70	36,59	37,64
148	27,04	32,79	36,61	37,60
150	27,01	32,74	36,59	37,60
152	27,07	32,74	36,55	37,51
154	27,07	32,72	36,52	37,46
156	26,94	32,55	36,40	37,38
158	27,03	32,58	36,35	37,25
160	27,03	32,56	36,33	37,22
162	27,09	32,55	36,28	37,13
164	27,00	32,46	36,26	37,15
166	26,99	32,42	36,23	37,12
168	26,93	32,33	36,11	37,00
170	26,83	32,20	36,02	36,91
172	26,79	32,14	35,99	36,92
174	26,77	32,08	35,96	36,87
176	26,91	32,16	35,90	36,70
178	26,83	32,06	35,88	36,74
180	26,84	32,04	35,84	36,69

182	26,75	31,93	35,74	36,58
184	26,94	32,03	35,77	36,52
186	27,03	32,09	35,79	36,50
188	27,09	32,10	35,75	36,41
190	27,04	32,04	35,72	36,41
192	26,64	31,65	35,49	36,29
194	26,62	31,61	35,44	36,25
196	26,62	31,54	35,32	36,06
198	26,67	31,57	35,31	36,03
200	26,68	31,54	35,29	36,00
202	26,54	31,37	35,17	35,91
204	26,58	31,37	35,13	35,83
206	26,59	31,34	35,09	35,77
208	26,71	31,42	35,13	35,76
210	26,60	31,29	35,03	35,68
212	26,42	31,12	34,93	35,63
214	26,64	31,28	35,02	35,66
216	26,65	31,26	34,99	35,61
218	26,65	31,23	34,96	35,57
220	26,63	31,18	34,91	35,51
222	26,38	30,93	34,73	35,39
224	26,43	30,93	34,68	35,29
226	26,49	30,96	34,71	35,31
228	26,27	30,73	34,51	35,13
230	26,39	30,80	34,53	35,12
232	26,49	30,87	34,57	35,11
234	26,41	30,76	34,45	34,98
236	26,37	30,69	34,41	34,97
238	26,35	30,64	34,36	34,91
240	26,50	30,75	34,38	34,85
242	26,27	30,51	34,22	34,74
244	26,36	30,56	34,23	34,70
246	26,37	30,54	34,18	34,66
248	26,08	30,26	33,99	34,52
250	26,34	30,47	34,16	34,66
252	26,34	30,45	34,13	34,61
254	26,29	30,39	34,10	34,60
256	26,24	30,30	33,96	34,43
258	26,24	30,26	33,92	34,38
260	26,20	30,20	33,87	34,32
262	26,21	30,18	33,84	34,28
264	26,31	30,25	33,86	34,26
266	26,23	30,15	33,73	34,11
268	26,19	30,08	33,68	34,07
270	26,28	30,13	33,72	34,10
272	26,01	29,88	33,54	33,97
274	26,21	30,01	33,55	33,88
276	26,19	29,97	33,51	33,83

278	26,19	29,93	33,47	33,78
280	26,31	30,02	33,51	33,78
282	25,86	29,60	33,28	33,71
284	25,95	29,64	33,22	33,58
286	25,90	29,58	33,19	33,57
288	26,02	29,65	33,22	33,56
290	26,16	29,74	33,25	33,52
292	26,15	29,72	33,21	33,47
294	25,92	29,48	33,04	33,35
296	25,98	29,51	33,08	33,39
298	25,91	29,44	33,07	33,42
300	25,94	29,45	33,03	33,37
302	25,92	29,39	32,91	33,19
304	25,79	29,24	32,82	33,12
306	25,83	29,25	32,77	33,04
308	25,79	29,19	32,74	33,04
310	25,76	29,15	32,71	32,99
312	25,74	29,10	32,66	32,95
314	25,70	29,05	32,64	32,96
316	25,98	29,27	32,73	32,93
318	25,77	29,04	32,54	32,78
320	25,67	28,93	32,43	32,65
322	25,80	29,02	32,46	32,64
324	25,80	29,00	32,44	32,61
326	25,62	28,83	32,35	32,61
328	25,50	28,74	32,27	32,52
330	25,68	28,82	32,28	32,46
332	25,54	28,67	32,17	32,39
334	25,40	28,53	32,07	32,33
336	25,63	28,69	32,09	32,23
338	25,60	28,65	32,08	32,23
340	25,76	28,79	32,21	32,36
342	25,77	28,76	32,19	32,33
344	25,81	28,76	32,12	32,20
346	25,41	28,40	31,90	32,09
348	25,50	28,46	31,91	32,08
350	25,65	28,56	31,93	32,03
352	25,72	28,59	31,88	31,90
354	25,68	28,53	31,85	31,89
356	25,79	28,62	31,88	31,89
358	25,37	28,23	31,65	31,78
360	25,41	28,22	31,60	31,69
362	25,40	28,20	31,57	31,64
364	25,43	28,19	31,52	31,56
366	25,61	28,35	31,62	31,63
368	25,47	28,19	31,51	31,54
370	25,46	28,16	31,47	31,49
372	25,62	28,28	31,50	31,44

374	25,42	28,09	31,39	31,40
376	25,46	28,08	31,34	31,33
378	25,55	28,15	31,37	31,30
380	25,44	28,02	31,26	31,21
382	25,15	27,75	31,07	31,10
384	25,27	27,83	31,10	31,09
386	25,25	27,80	31,06	31,04
388	25,29	27,82	31,08	31,06
390	25,16	27,68	30,97	30,97
392	25,22	27,73	31,01	31,00
394	25,14	27,61	30,89	30,89
396	25,32	27,77	31,01	30,96
398	25,26	27,68	30,91	30,86
400	25,23	27,64	30,86	30,80
402	25,27	27,65	30,82	30,72
404	25,39	27,73	30,86	30,73
406	25,39	27,71	30,84	30,69
408	25,11	27,45	30,68	30,63
410	25,18	27,50	30,73	30,68
412	25,29	27,59	30,77	30,68
414	24,88	27,21	30,53	30,57
416	25,10	27,39	30,63	30,60
418	25,12	27,38	30,58	30,51
420	25,10	27,31	30,44	30,30
422	25,05	27,25	30,40	30,29
424	24,96	27,18	30,36	30,28
426	24,98	27,18	30,39	30,34
428	24,95	27,13	30,35	30,31
430	24,91	27,08	30,30	30,25
432	24,93	27,07	30,25	30,16
434	24,92	27,04	30,19	30,10
436	24,94	27,02	30,13	30,00
438	24,80	26,90	30,12	30,08
440	24,80	26,88	30,05	29,98
442	24,64	26,72	29,95	29,94
444	24,77	26,81	29,97	29,89
446	24,79	26,81	29,92	29,80
448	24,76	26,75	29,87	29,76
450	24,75	26,73	29,84	29,72
452	24,82	26,77	29,88	29,76
454	24,92	26,86	29,91	29,76
456	24,78	26,71	29,80	29,68
458	24,61	26,55	29,71	29,65
460	24,72	26,64	29,74	29,64
462	24,63	26,53	29,63	29,53
464	24,61	26,50	29,59	29,50
466	24,81	26,64	29,65	29,48
468	24,75	26,57	29,56	29,37

470	24,77	26,56	29,56	29,37
472	24,90	26,66	29,61	29,39
474	24,97	26,73	29,67	29,44
476	24,74	26,49	29,51	29,35
478	24,80	26,52	29,48	29,28
480	24,67	26,39	29,39	29,22
482	24,66	26,37	29,36	29,19
484	24,69	26,37	29,32	29,11
486	24,73	26,41	29,36	29,16
488	24,66	26,32	29,27	29,06
490	24,40	26,08	29,09	28,94
492	24,42	26,10	29,14	29,04
494	24,42	26,07	29,12	29,00
496	24,40	26,05	29,08	28,97
498	24,15	25,81	28,91	28,86
500	24,62	26,19	29,06	28,81
502	24,51	26,07	28,96	28,74
504	24,69	26,23	29,08	28,82
506	24,69	26,22	29,06	28,79
508	24,45	25,98	28,90	28,69
510	24,41	25,94	28,88	28,72
512	24,53	26,04	28,93	28,73
514	24,62	26,08	28,90	28,62
516	24,63	26,07	28,88	28,61
518	24,32	25,80	28,72	28,55
520	24,32	25,79	28,70	28,54
522	24,23	25,68	28,62	28,48
524	24,28	25,68	28,56	28,37
526	24,30	25,71	28,60	28,41
528	24,10	25,55	28,50	28,39
530	24,03	25,45	28,41	28,29
532	24,19	25,57	28,45	28,26
534	24,27	25,64	28,49	28,30
536	24,06	25,43	28,32	28,15
538	24,16	25,51	28,36	28,16
540	24,07	25,41	28,25	28,05
542	24,17	25,48	28,29	28,05
544	24,27	25,56	28,31	28,05
546	24,10	25,44	28,26	28,08
548	24,19	25,47	28,26	28,01
550	24,00	25,31	28,16	27,98
552	24,22	25,48	28,26	28,03
554	24,09	25,36	28,16	27,95
556	24,04	25,30	28,14	27,95
558	24,15	25,39	28,18	27,95
560	24,18	25,39	28,14	27,88
562	24,13	25,33	28,11	27,89
564	24,19	25,35	28,07	27,78

566	24,17	25,34	28,04	27,74
568	24,17	25,31	28,00	27,71
570	24,12	25,28	27,99	27,71
572	24,15	25,27	27,95	27,65
574	24,22	25,34	28,01	27,70
576	24,26	25,35	27,98	27,64
578	24,08	25,18	27,88	27,61
580	24,07	25,17	27,86	27,59
582	24,06	25,14	27,84	27,56
584	23,92	25,01	27,74	27,49
586	23,89	24,97	27,74	27,52
588	23,90	24,96	27,69	27,44
590	23,94	24,97	27,66	27,38
592	23,97	24,98	27,61	27,30
594	23,80	24,83	27,54	27,27
596	23,73	24,76	27,51	27,29
598	23,86	24,86	27,56	27,30
600	23,79	24,81	27,54	27,31
602	24,17	25,08	27,65	27,28
604	24,14	25,07	27,59	27,20
606	24,10	25,03	27,58	27,22
608	23,82	24,77	27,40	27,11
610	23,94	24,86	27,45	27,11
612	23,80	24,71	27,34	27,04
614	23,79	24,68	27,31	27,01
616	23,87	24,76	27,36	27,06
618	23,68	24,59	27,27	27,03
620	23,70	24,59	27,23	26,96
622	23,77	24,65	27,27	27,00
624	23,78	24,64	27,27	26,99
626	23,69	24,53	27,16	26,88
628	23,68	24,52	27,14	26,87
630	23,63	24,46	27,04	26,75
632	23,85	24,64	27,17	26,82
634	23,86	24,64	27,16	26,80
636	23,86	24,63	27,14	26,79
638	23,75	24,52	27,06	26,74
640	23,89	24,64	27,13	26,77
642	23,83	24,59	27,13	26,80
644	23,87	24,60	27,09	26,74
646	23,66	24,40	26,92	26,61
648	23,62	24,37	26,92	26,63
650	23,53	24,27	26,82	26,52
652	23,66	24,38	26,87	26,55
654	23,47	24,18	26,78	26,53
656	23,77	24,43	26,90	26,55
658	23,59	24,27	26,76	26,42
660	23,70	24,36	26,80	26,44

662	23,69	24,35	26,79	26,44
664	23,82	24,46	26,86	26,46
666	23,76	24,39	26,78	26,36
668	23,64	24,30	26,79	26,48
670	23,69	24,32	26,77	26,43
672	23,58	24,20	26,70	26,38
674	23,77	24,36	26,73	26,31
676	23,70	24,28	26,65	26,23
678	23,66	24,26	26,65	26,26
680	23,65	24,22	26,62	26,23
682	23,64	24,22	26,60	26,21
684	23,43	24,01	26,43	26,07
686	23,29	23,89	26,34	26,01
688	23,49	24,05	26,47	26,11
690	23,48	24,04	26,44	26,08
692	23,62	24,15	26,48	26,06
694	23,61	24,13	26,45	26,02
696	23,48	24,01	26,36	25,96
698	23,43	23,95	26,35	25,98
700	23,58	24,07	26,39	25,96
702	23,58	24,07	26,37	25,94
704	23,54	24,03	26,37	25,96
706	23,53	24,02	26,36	25,94
708	23,37	23,87	26,28	25,94
710	23,47	23,94	26,25	25,84
712	23,25	23,72	26,10	25,75
714	23,20	23,69	26,07	25,73
716	23,27	23,76	26,14	25,79
718	23,30	23,76	26,10	25,72
720	23,36	23,78	26,07	25,66

Tempo (minutos)	Controle Termômetro 1	30% cal hidratada Termômetro 2	40% cal hidratada Termômetro 3	50% cal hidratada Termômetro 4
0	23,77	26,84	27,61	26,65
2	23,73	26,81	27,65	26,67
4	23,70	26,85	27,85	26,92
6	23,96	27,10	28,10	27,10
8	23,96	27,12	28,19	27,12
10	23,80	26,98	28,18	27,13
12	23,79	26,98	28,22	27,15
14	23,73	26,93	28,26	27,22
16	23,80	26,97	28,27	27,17
18	23,80	26,98	28,32	27,23
20	23,82	26,99	28,34	27,26
22	24,03	27,16	28,45	27,30
24	24,09	27,20	28,49	27,32

26	23,94	27,07	28,39	27,27
28	24,00	27,12	28,46	27,35
30	24,11	27,19	28,49	27,35
32	24,05	27,14	28,47	27,36
34	24,20	27,25	28,52	27,37
36	24,27	27,32	28,58	27,43
38	24,17	27,24	28,58	27,50
40	24,47	27,49	28,70	27,53
42	24,56	27,57	28,78	27,61
44	24,50	27,50	28,70	27,53
46	24,37	27,39	28,67	27,57
48	24,46	27,45	28,67	27,55
50	24,45	27,45	28,72	27,63
52	24,46	27,44	28,66	27,54
54	24,43	27,39	28,61	27,50
56	24,59	27,55	28,73	27,60
58	24,64	27,58	28,76	27,63
60	24,60	27,54	28,72	27,60
62	24,47	27,44	28,68	27,64
64	24,45	27,41	28,62	27,54
66	24,39	27,34	28,59	27,54
68	24,43	27,40	28,65	27,64
70	24,57	27,51	28,72	27,66
72	24,73	27,66	28,83	27,74
74	24,47	27,42	28,66	27,64
76	24,57	27,49	28,69	27,65
78	24,66	27,57	28,74	27,67
80	24,66	27,56	28,72	27,66
82	24,60	27,51	28,70	27,68
84	24,72	27,61	28,76	27,70
86	24,57	27,47	28,66	27,65
88	24,67	27,55	28,71	27,67
90	24,57	27,46	28,66	27,68
92	24,58	27,47	28,67	27,67
94	24,64	27,52	28,71	27,72
96	24,64	27,50	28,66	27,66
98	24,84	27,68	28,77	27,69
100	24,68	27,54	28,69	27,67
102	24,65	27,51	28,66	27,65
104	24,42	27,31	28,57	27,67
106	24,35	27,26	28,56	27,70
108	24,37	27,26	28,52	27,63
110	24,50	27,36	28,58	27,66
112	24,65	27,49	28,61	27,63
114	24,60	27,44	28,61	27,66
116	24,43	27,29	28,54	27,66
118	24,47	27,30	28,51	27,61
120	24,58	27,40	28,56	27,64

122	24,53	27,37	28,56	27,67
124	24,50	27,33	28,54	27,67
126	24,70	27,49	28,60	27,66
128	24,79	27,57	28,68	27,74
130	24,71	27,49	28,60	27,62
132	24,75	27,53	28,60	27,59
134	24,69	27,47	28,61	27,67
136	24,56	27,36	28,53	27,64
138	24,56	27,35	28,53	27,64
140	24,52	27,29	28,45	27,57
142	24,49	27,27	28,43	27,55
144	24,49	27,27	28,43	27,56
146	24,37	27,15	28,35	27,52
148	24,53	27,27	28,41	27,50
150	24,53	27,27	28,40	27,50
152	24,49	27,24	28,40	27,54
154	24,32	27,10	28,33	27,54
156	24,46	27,21	28,39	27,57
158	24,65	27,37	28,45	27,56
160	24,44	27,17	28,31	27,46
162	24,50	27,20	28,30	27,42
164	24,78	27,44	28,43	27,46
166	24,62	27,31	28,37	27,48
168	24,61	27,29	28,39	27,54
170	24,67	27,34	28,38	27,50
172	24,38	27,09	28,24	27,47
174	24,57	27,23	28,32	27,48
176	24,47	27,14	28,26	27,46
178	24,38	27,06	28,21	27,45
180	24,39	27,06	28,21	27,45
182	24,40	27,07	28,21	27,47
184	24,43	27,09	28,24	27,49
186	24,38	27,04	28,17	27,43
188	24,43	27,08	28,17	27,40
190	24,39	27,01	28,10	27,34
192	24,26	26,91	28,06	27,36
194	24,19	26,83	27,99	27,30
196	24,35	26,96	28,08	27,37
198	24,27	26,89	28,04	27,35
200	24,32	26,92	28,04	27,33
202	24,36	26,95	28,06	27,36
204	24,50	27,07	28,14	27,41
206	24,45	27,03	28,09	27,35
208	24,49	27,05	28,11	27,39
210	24,51	27,07	28,12	27,40
212	24,48	27,02	28,06	27,34
214	24,23	26,81	27,93	27,30
216	24,15	26,73	27,89	27,29

218	24,53	27,04	28,05	27,32
220	24,51	27,00	27,97	27,21
222	24,56	27,04	28,00	27,25
224	24,58	27,06	28,02	27,27
226	24,25	26,77	27,84	27,20
228	24,45	26,93	27,92	27,22
230	24,37	26,85	27,87	27,21
232	24,41	26,89	27,91	27,24
234	24,35	26,82	27,84	27,19
236	24,20	26,68	27,73	27,12
238	24,45	26,90	27,88	27,21
240	24,39	26,84	27,85	27,22
242	24,20	26,67	27,74	27,18
244	24,11	26,59	27,71	27,18
246	24,26	26,72	27,79	27,24
248	24,30	26,72	27,74	27,16
250	24,15	26,61	27,71	27,21
252	24,27	26,69	27,72	27,17
254	24,30	26,69	27,68	27,09
256	24,34	26,74	27,71	27,12
258	24,17	26,56	27,60	27,06
260	24,23	26,61	27,63	27,09
262	24,28	26,66	27,67	27,14
264	24,21	26,59	27,64	27,15
266	24,22	26,59	27,59	27,07
268	24,35	26,67	27,60	27,03
270	24,30	26,63	27,60	27,05
272	24,11	26,45	27,49	27,02
274	24,15	26,50	27,53	27,07
276	24,13	26,46	27,50	27,05
278	23,93	26,28	27,40	27,02
280	23,93	26,27	27,37	26,99
282	24,02	26,34	27,41	27,00
284	23,92	26,23	27,30	26,90
286	23,95	26,26	27,35	26,98
288	23,65	25,99	27,16	26,88
290	23,86	26,15	27,26	26,91
292	23,93	26,22	27,30	26,95
294	24,02	26,29	27,33	26,95
296	23,86	26,14	27,22	26,88
298	24,00	26,24	27,25	26,83
300	23,95	26,19	27,19	26,80
302	23,98	26,21	27,25	26,88
304	24,02	26,24	27,28	26,92
306	23,95	26,19	27,25	26,92
308	24,13	26,31	27,25	26,83
310	24,16	26,34	27,28	26,87
312	24,10	26,29	27,26	26,88

314	23,95	26,13	27,15	26,80
316	23,89	26,07	27,09	26,76
318	24,01	26,16	27,13	26,75
320	24,11	26,26	27,24	26,88
322	24,13	26,25	27,19	26,79
324	23,85	26,00	27,00	26,69
326	23,90	26,03	27,03	26,71
328	24,06	26,15	27,06	26,67
330	24,27	26,32	27,16	26,71
332	24,01	26,07	26,98	26,60
334	24,14	26,20	27,07	26,66
336	24,10	26,15	27,01	26,62
338	24,04	26,09	26,98	26,62
340	23,95	26,00	26,94	26,61
342	24,00	26,04	26,96	26,64
344	23,91	25,94	26,82	26,48
346	23,86	25,89	26,80	26,48
348	23,93	25,94	26,81	26,47
350	23,88	25,89	26,76	26,42
352	23,91	25,92	26,81	26,51
354	24,04	26,00	26,83	26,46
356	24,12	26,07	26,86	26,48
358	24,06	26,00	26,82	26,46
360	24,05	26,00	26,86	26,54
362	23,86	25,83	26,75	26,51
364	23,93	25,88	26,76	26,48
366	23,90	25,83	26,71	26,44
368	23,88	25,80	26,65	26,34
370	23,90	25,81	26,66	26,36
372	23,82	25,74	26,62	26,35
374	23,76	25,67	26,54	26,29
376	23,95	25,82	26,63	26,31
378	24,13	25,98	26,70	26,32
380	24,14	25,98	26,70	26,33
382	23,98	25,85	26,65	26,34
384	24,02	25,87	26,64	26,30
386	23,99	25,85	26,65	26,35
388	24,01	25,86	26,65	26,34
390	24,02	25,85	26,65	26,35
392	24,01	25,85	26,64	26,35
394	24,01	25,84	26,64	26,35
396	23,96	25,79	26,61	26,33
398	23,98	25,78	26,55	26,27
400	24,04	25,83	26,54	26,20
402	23,82	25,63	26,43	26,18
404	23,86	25,66	26,48	26,24
406	23,86	25,66	26,48	26,25
408	23,66	25,45	26,33	26,13

410	23,79	25,57	26,39	26,16
412	23,88	25,64	26,41	26,15
414	23,86	25,63	26,46	26,25
416	23,91	25,66	26,45	26,21
418	24,02	25,73	26,43	26,12
420	23,90	25,62	26,36	26,09
422	23,92	25,62	26,37	26,09
424	23,88	25,60	26,37	26,14
426	23,76	25,48	26,28	26,10
428	23,80	25,50	26,27	26,06
430	23,81	25,50	26,28	26,05
432	23,75	25,42	26,19	25,98
434	23,68	25,38	26,21	26,07
436	23,86	25,51	26,28	26,07
438	23,76	25,42	26,21	26,03
440	23,76	25,42	26,21	26,04
442	23,74	25,39	26,20	26,04
444	23,79	25,41	26,19	25,99
446	23,77	25,40	26,20	26,03
448	23,74	25,35	26,10	25,91
450	23,71	25,32	26,11	25,95
452	23,88	25,46	26,18	25,95
454	23,78	25,36	26,10	25,92
456	23,82	25,39	26,09	25,89
458	23,65	25,24	26,02	25,88
460	23,83	25,38	26,09	25,88
462	23,81	25,35	26,10	25,93
464	23,81	25,36	26,10	25,94
466	23,82	25,35	26,09	25,93
468	23,69	25,22	26,01	25,90
470	23,75	25,26	26,01	25,85
472	23,76	25,26	26,00	25,86
474	23,75	25,26	26,00	25,84
476	23,69	25,18	25,94	25,82
478	23,83	25,30	25,99	25,81
480	23,83	25,29	25,99	25,81
482	23,84	25,29	25,99	25,81
484	23,66	25,14	25,92	25,82
486	23,78	25,23	25,94	25,79
488	23,59	25,06	25,85	25,79
490	23,56	25,03	25,87	25,85
492	23,56	25,03	25,87	25,85
494	23,69	25,10	25,84	25,73
496	23,71	25,11	25,85	25,74
498	23,73	25,13	25,85	25,74
500	23,75	25,14	25,84	25,72
502	23,55	24,94	25,70	25,62
504	23,50	24,90	25,69	25,66

506	23,55	24,92	25,68	25,63
508	23,40	24,80	25,63	25,63
510	23,63	24,97	25,69	25,60
512	23,59	24,95	25,69	25,64
514	23,73	25,06	25,77	25,70
516	23,69	25,03	25,78	25,74
518	23,45	24,81	25,64	25,66
520	23,35	24,71	25,57	25,63
522	23,53	24,86	25,64	25,63
524	23,54	24,86	25,64	25,64
526	23,57	24,87	25,63	25,61
528	23,36	24,68	25,49	25,53
530	23,43	24,72	25,50	25,50
532	23,48	24,75	25,49	25,47
534	23,46	24,73	25,51	25,52
536	23,51	24,77	25,50	25,48
538	23,41	24,66	25,44	25,45
540	23,36	24,62	25,44	25,50
542	23,24	24,51	25,38	25,46
544	23,39	24,63	25,45	25,52
546	23,57	24,78	25,51	25,51
548	23,45	24,66	25,45	25,47
550	23,11	24,36	25,25	25,38
552	23,10	24,34	25,24	25,38
554	23,10	24,33	25,23	25,37
556	23,28	24,48	25,29	25,36
558	23,45	24,62	25,35	25,35
560	23,34	24,52	25,28	25,32
562	23,51	24,64	25,33	25,31
564	23,45	24,60	25,33	25,35
566	23,13	24,30	25,11	25,21
568	23,24	24,40	25,17	25,24
570	23,18	24,33	25,09	25,14
572	23,39	24,51	25,23	25,25
574	23,39	24,51	25,23	25,26
576	23,44	24,55	25,23	25,21
578	23,33	24,42	25,14	25,17
580	23,09	24,21	25,01	25,10
582	23,08	24,20	24,99	25,09
584	23,06	24,17	24,97	25,08
586	23,20	24,28	25,04	25,12
588	23,06	24,15	24,96	25,08
590	23,19	24,26	25,03	25,11
592	23,09	24,16	24,96	25,07
594	23,22	24,27	25,02	25,10
596	23,22	24,27	25,02	25,10
598	23,27	24,30	25,00	25,07
600	23,00	24,06	24,88	25,03

602	23,13	24,17	24,92	25,02
604	23,22	24,24	25,00	25,10
606	22,98	24,03	24,85	25,02
608	23,21	24,20	24,90	24,96
610	23,21	24,20	24,90	24,97
612	23,05	24,05	24,83	24,97
614	23,31	24,28	24,98	25,04
616	23,28	24,26	24,96	25,04
618	23,24	24,21	24,97	25,08
620	23,04	24,02	24,81	24,95
622	23,04	24,02	24,80	24,95
624	23,03	24,01	24,79	24,95
626	23,04	24,00	24,78	24,94
628	22,95	23,91	24,70	24,85
630	23,11	24,04	24,75	24,84
632	23,24	24,15	24,80	24,86
634	23,19	24,07	24,73	24,78
636	23,11	24,02	24,71	24,81
638	22,81	23,75	24,56	24,76
640	22,98	23,89	24,62	24,76
642	23,01	23,90	24,60	24,71
644	23,01	23,90	24,59	24,69
646	23,02	23,89	24,59	24,68
648	23,18	24,03	24,66	24,73
650	22,97	23,84	24,58	24,71
652	22,89	23,76	24,49	24,62
654	22,88	23,74	24,47	24,61
656	23,01	23,85	24,54	24,65
658	22,94	23,79	24,53	24,68
660	23,05	23,88	24,59	24,70
662	23,06	23,88	24,58	24,69
664	23,05	23,87	24,56	24,68
666	22,97	23,78	24,48	24,59
668	22,84	23,65	24,38	24,54
670	22,83	23,64	24,37	24,53
672	22,99	23,77	24,42	24,51
674	22,94	23,73	24,42	24,55
676	22,93	23,72	24,40	24,53
678	22,95	23,72	24,40	24,52
680	23,05	23,80	24,45	24,55
682	22,82	23,61	24,37	24,57
684	22,82	23,60	24,37	24,57
686	22,78	23,54	24,27	24,44
688	23,06	23,78	24,39	24,46
690	22,85	23,60	24,33	24,49
692	23,01	23,73	24,37	24,48
694	23,00	23,72	24,35	24,46
696	22,75	23,48	24,21	24,38

698	22,82	23,55	24,27	24,45
700	22,89	23,61	24,33	24,52
702	22,77	23,50	24,25	24,46
704	22,71	23,40	24,12	24,34
706	23,00	23,67	24,27	24,36
708	23,08	23,74	24,32	24,38
710	22,87	23,54	24,18	24,31
712	22,76	23,44	24,10	24,26
714	22,68	23,37	24,12	24,34
716	22,75	23,44	24,19	24,41
718	22,56	23,26	24,04	24,30
720	22,68	23,35	24,08	24,29

APÊNDICE 4 – TABELAS DOS VALORES DE COLIFORMES TERMOTOLERANTES

TEMPO	Coliformes termotolerantes		
	Controle	Cal virgem	Cal hidratada
T 0 dia	4,41E+07	2,89E+00	6,80E+03
T 3 dia	2,44E+07	1,00E+00	1,00E+03
T 7 dia	1,40E+07	8,90E-01	1,68E+02
T 14 dia	7,64E+04	8,30E-01	8,10E-01
T 30 dia	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00