

cadernos técnicos **engenharia** **sanitária e ambiental**

Órgão Oficial de Informação Técnica da ABES - Rio de Janeiro

Coletânea de Notas Técnicas 2: Valoração e gerenciamento dos subprodutos sólidos do tratamento do esgoto

Parte A: Higienização e uso de lodo de esgoto no solo

A Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, em conjunto com Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Esgotamento Sanitário (INCT ETEs Sustentáveis), deu vida aos Cadernos de Nota Técnica ESA apresentado, onde tem por objetivo a publicação de contribuições técnicas e científicas nas áreas de saneamento, e suas interfaces. As contribuições são publicadas após aprovação do conselho editorial formado exclusivamente para este fim. Os artigos publicados não refletem necessariamente a opinião da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES).

Diretor Responsável

Alceu Guérios Bittencourt

Editor Geral

André Bezerra dos Santos

Editor Geral Adjunto

Maurício Alves da Motta Sobrinho

Coordenação

Allan Rodrigues

INCT ETEs Sustentáveis

Coordenação Geral

Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

Cesar Rossas Mota Filho

Juliana Calabria Araújo

Coordenadores Institucionais

Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

André Bezerra dos Santos

Isaac Volschan Jr

Gustavo Rafael Collere Possetti

Lourdinha Florêncio

Paula Loureiro Paulo

Roque Passos Pivelli

Cadernos Técnicos ESA

Colaboração

Câmara Técnica de Tratamento de Esgoto (CTTE) da ABES

Conselho Editorial Geral

Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

Rodrigo Moruzzi

Editores associados

Mário Takayuki Kato

Isaac Volschan Jr

Lucas de Almeida Chamhum-Silva

Editores Executivos

Lariza dos Santos Azevedo

Livia Cristina da Silva Lobato

Revisão Técnica Final

Erlon Lopes Pereira (t)

Marcelo Kenji Miki

Paulo Sérgio Scalize

Simone Bittencourt

Revisão, validação e editoração

Lariza dos Santos Azevedo

Livia Cristina da Silva Lobato

Tiago Borges Ferreira

Vera Tainá Franco Vidal Mota

Correspondência

Avenida Beira Mar, 216, 13º andar

CEP: 20021-060 - Rio de Janeiro (RJ), Brasil

Tel: (21) 2277-3900 - E-mail: esa@abes-dn.org.br

PRODUÇÃO EDITORIAL



Estatuto em Vigor: Alteração de Estatuto referendado pela Assembleia Geral Extraordinária realizada no Rio de Janeiro (RJ) em 08 de julho de 2011. Essa nova versão do Estatuto recebeu protocolo número 201108081358447 e foi averbada na matrícula número 1244 do Registro Civil de Pessoas Jurídicas do Rio de Janeiro em 25 de agosto de 2011.

cadernos técnicos engenharia sanitária e ambiental

Cadernos Técnico Eng Sanit Ambient | v.2 n.1 | 2022 | jan/mar



Créditos da imagem da capa: Clodoaldo José Marques (arquivo pessoal)

CORPO EDITORIAL PERMANENTE

Editor Geral: André Bezerra dos Santos, Universidade Federal do Ceará, Brasil

Editor Geral Adjunto: Maurício Alves da Motta Sobrinho, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

Editor Coordenador: Allan Rodrigues, Abes, Brasil

EDITORES ASSOCIADOS:

André Luiz de Oliveira, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil

Davi Gasparini Fernandes Cunha, Universidade de São Paulo, Brasil

Eraldo Henriques de Carvalho, Universidade Federal de Goiás, Brasil

João Paulo Bassin, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

Jorge M.G.P. Isidoro, Universidade do Algarve, Portugal

Lisete Celina Lange, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

Lucas Meili, Universidade Federal de Alagoas, Brasil

Luciana Paulo Gomes, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil

Luciano Matos Queiroz, Universidade Federal da Bahia, Brasil

Luewton Lemos F. Agostinho, NHL Stenden University of Applied Sciences, Holanda

Luiza Girard Teixeira, Universidade Federal do Pará, Brasil

Marcelo Motta Veiga, Escola Nacional de Saúde Pública, Brasil

Maurício Alves da Motta Sobrinho, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

Pablo Heleno Sezerino, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Paulo Sérgio Scalize, Universidade Federal de Goiás, Brasil

Raul Muñoz, Universidad de Valladolid, Spain

Rodrigo Moruzzi, Universidade Estadual Paulista, Brasil

Revista Engenharia Sanitária e Ambiental Fundada com o título Engenharia Sanitária em 1962 (vol.1, n.1, jun de 1962) com formato 18,0 x 26,0 cm, até o vol.12, n.3, quando foi adotado o formato A4. A partir do vol.28, abr./jun. de 1989, passou a chamar-se BIO, com o formato 21,0 x 28,0 cm, sendo a Engenharia Sanitária transformada em encarte técnico da BIO. A partir de 1996, retorna a Engenharia Sanitária, desta feita incorporando a palavra Ambiental (Ano I, n.1, jan./mar. 1996).

DIRETORIA NACIONAL

Presidente: Alceu Guérios Bittencourt; **Vice-Presidente:** Mario Cezar Guerino; **Secretário Geral:** Marcel Costa Sanches; **Secretário Adjunto:** Rafael Carvalho de O. Santos; **Tesoureiro Geral:** Maria Lúcia B. Coelho Silva; **Tesoureiro Adjunto:** Álvaro José Menezes da Costa; **Diretor Sul:** Edgard Faust Filho; **Diretora Sudeste:** Célia Regina Alves Rennó; **Diretor Centro-Oeste:** Marcos Elano F. Montenegro; **Diretora Nordeste:** Vanessa Britto Silveira Cardoso; **Diretor Norte:** Haroldo Costa Bezerra; **Coordenador de Relações Internacionais:** Carlos Alberto Rosito; **Coordenador do Programa Jovens Profissionais do Saneamento:** Witan Silva.

CONSELHO FISCAL

Efetivos: Carlos Alberto Rosito (RJ); Edson Melo Filizzola (GO); Miguel Mansur Aisse (PR).

Suplentes: Carlos Roberto Soares Mingione (SP); Hélio Nazareno Padula Filho (SP); Reynaldo Eduardo Young Ribeiro (SP)

CONSELHO DIRETOR

Membros Natos: Antônio César da Costa e Silva (SP), Antônio Marsiglia Netto (SP), Carlos Alberto Rosito (RJ), Cassilda Teixeira de Carvalho (MG), Clovis Francisco do Nascimento Filho (RJ), Dante Ragazzi Pauli (SP), Hugo de Mattos Santos (RJ), João Alberto Viol (SP), José Aurélio Boranga (SP), José Carlos Vieira (RJ), Lineu Rodrigues Alonso (SP), Luiz

Otávio Mota Pereira (PA), Nelson Rodrigues Nucci (SP), Paulo Cezar Pinto (RJ), Roberval Tavares de Souza (SP) e Walter Pinto Costa (RJ).

Membros Eleitos 2020/2022

Mario Cezar Guerino
Marcel Costa Sanches
Rafael Carvalho de O. Santos
Maria Lúcia B. Coelho Silva
Álvaro José Menezes da Costa
Edgard Faust Filho
Célia Regina Alves Rennó
Marcos Heleno F. Montenegro
Vanessa Britto Silveira Cardoso
Haroldo Costa Bezerra
Carlos Alberto Rosito
Witan Silva

Presidentes das Seções Estaduais 2019/2021

Ana Catarina Pires de Azevedo Lopes (AL)
Rainier Pedraça de Azevedo (AM)
Arnor de Oliveira Fernandes Junior (BA)
Francisco Humberto de Carvalho Junior (CE)
Sergio Antonio Gonçalves (DF)

Edumar Ramos Cabral Coelho (ES)
Marisa Pignataro de Sant'anna (GO)
Nelson José Bello Cavalcante (MA)
Rogerio Pena Siqueira (MG)
Aroldo Ferreira Galvão (MS)
Rosidelma Francisca Guimarães Santos (MT)
Vanessa Souza Alvares de Mello (PA)
Jaqueline Pequeno da Silva (PB)
Sergio Xavier dos Santos (PE)
Carlos Ernando da Silva (PI)
Luiz Henrique Bucco (PR)
Miguel Alvarenga Fernández Y Fernández (RJ)
Maria Geny Formiga de Farias (RN)
Jussara Kalil Pires (RS)
Andreia May (SC)
Marcio Gonçalves de Oliveira (SP)

Representantes das Seções Estaduais 2019/2021

Ana Catarina Pires de Azevedo Lopes (AL)
Silvio Roberto Magalhães Orrico (BA)
Sergio Antonio Gonçalves (DF)

Divino Lazaro de Souza Aguiar (GO)
Fabio Julian de Sousa (GO)
Maria do Carmo Varella Bastos (MG)
Ronaldo Vasconcellos Novais (MG)
Antonio Carlos Gerardi (PR)
Antonio Roberto Sartor (PR)
Miguel Alvarenga Fernández Y Fernández (RJ)
Eduardo Pacheco Jordão (RJ)
Geraldo Antonio Reichert (RS)
Jairo Tardelli Filho (SP)
Monica Ferreira do Amaral Porto (SP)
Osvaldo Ioshio Niida (SP)
Antonio Carlos da Costa Lino (SP)
Vasti Ribeiro Facincani (SP)
Ricardo Toledo Silva (SP)
Sadalla Domingos (SP)
Alvaro Diogo Sobral Teixeira (SP)
João Cesar Queiroz Prado (SP-SUB)
Fábio Severo (SP-SUB)
Antonio Rodrigues da Grela Filho (SP-SUB)
Tsunao Matsumoto (SP-SUB)
Jorge Luiz Monteiro (SP-SUB)

COLETÂNEA DE NOTAS TÉCNICAS 2: VALORAÇÃO E GERENCIAMENTO DOS SUBPRODUTOS SÓLIDOS DO TRATAMENTO DO ESGOTO COLLECTION OF THE TECHNICAL NOTES 2: VALORATION AND MANAGEMENT OF SOLIDS BY-PRODUCTS OF SEWAGE TREATMENT

Parte A: Higienização e uso de lodo de esgoto no solo

Part A: Sanitization and use of sewage sludge in soil

1 Editorial - ESA

Rodrigo Moruzzi e André Bezerra dos Santos

3 Editorial - INCT ETEs Sustentáveis

Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

5 Nota Técnica 1 - Tópicos de interesse

Technical Note 1 - Topics of interest

Kenia K. Barros, Carlos Augusto de Lemos Chernicharo, Cleverson Vitório Andreoli, Lucas de Almeida Chamhum-Silva, Simone Bittencourt, Mario Takayuki Kato

17 Nota Técnica 2 - Aspectos legais

Technical Note 2 - Legislation aspects

Simone Bittencourt, Antonio Teixeira de Matos, Bruno Sidnei da Silva, Marcelo Kenji Miki, Rafael Kopschitz Xavier Bastos

31 Nota Técnica 3 - Higienização de lodo via compostagem

Technical Note 3 - Sludge sanitization by composting

Antonio Teixeira de Matos, Renata Leandro Rodrigues Bortolini, Bárbara Albuquerque Branco de Moraes, Wanderli Rogério Moreira Leite, Mário Takayuki Kato

45 Nota Técnica 4 - Higienização de lodo via estabilização alcalina

Technical Note 4 - Sludge sanitization by alkaline stabilization

Cleverson Vitório Andreoli, Alexandre Klas Bico, Simone Bittencourt, Eduardo Sabino Pegorini, Gustavo Rafael Collere Possetti, Pedro Lindstron Wittica Cerqueira, Julio Cezar Rietow, Miguel Mansur Aisse

59 Nota Técnica 5 - Secagem e higienização térmica do lodo

Technical Note 5 - Thermal sludge drying and sanitization

Julio Cezar Rietow, Gustavo Rafael Collere Possetti, Lívia Cristina Silva Lobato, Cleverson Vitório Andreoli, Charles Carneiro, Alexandre Klaus Bico, Luiz Gustavo Wagner, Miguel Mansur Aisse

75 Nota Técnica 6 - Uso agrícola de biossólido

Technical Note 6 - Agricultural use of biosolids

Simone Bittencourt, Antônio Teixeira de Matos, Bruno Sidnei da Silva, Fernando Carvalho Oliveira, Lucas de Almeida Chamhum-Silva, Marcelo Kenji Miki, Alexandre Klas Bico

89 Nota Técnica 7 - Uso de biossólido para recuperação de áreas degradadas

Technical Note 7 - Use of biosolids to recover degraded areas

Lucas de Almeida Chamhum-Silva, Jonathas Batista Gonçalves Silva, Leiliane Saraiva Oliveira, Marcio Niemeyer Borges, Tiago Geraldo de Lima, Simone Bittencourt, Antônio Teixeira de Matos

ESA*

Desde sua fundação em 1962, a Revista Engenharia Sanitária e Ambiental (ESA) tem como missão a disseminação do conhecimento produzido na academia, empresas de pesquisa, concessionárias e empresas de saneamento, órgãos governamentais, profissionais técnicos, entre outros, por meio da publicação de artigos técnicos, revisões críticas e notas técnicas.

Os desafios na área da engenharia sanitária e ambiental são enormes e dinâmicos. Ao longo de sua história a ESA tem se adaptado às novas demandas e desafios, visando manter sua missão de publicar materiais técnicos e científicos de elevada qualidade e relevância nacional. Inicialmente, os artigos voltavam-se majoritariamente para soluções técnicas da Engenharia, aplicadas à área de Saneamento Básico. O crescente interesse pela área de meio ambiente ampliou o universo de atuação da Engenharia e trouxe novas dimensões para as pesquisas, abrindo portas para diferentes abordagens, com aumento significativo de contribuições à ESA. Mais recentemente, a ampliação da pós-graduação no Brasil e as exigências associadas aos seus programas e as agências de fomento à pesquisa aumentaram ainda mais o fluxo de artigos, exigindo grande esforço de todo corpo editorial e revisores voluntários.

Estruturalmente a ESA também se modernizou. A adoção de nova plataforma de gerenciamento, a definição de regras claras e rígidas de revisão por pares, a padronização das decisões do corpo editorial e a redução significativa do tempo de avaliação permitiram enfrentar os novos desafios e reforçar a qualidade dos manuscritos publicados. Entretanto, para além da sua história, tradição e reconhecimento dos pares, a reputação de um periódico é também aferida por meio de métricas internacionais, tal como o fator de impacto.

O fator de impacto tem grande importância na escolha do periódico pelos cientistas, pois afere sobre a visibilidade e a qualidade dos manuscritos publicados. Entretanto, são enormes os desafios de ampliar o fator de impacto de um periódico de circulação restrita nacional, dada a abrangência e o acesso limitados. Assim sendo, entendemos que a internacionalização da ESA é premente.

Todavia, a tarefa de internacionalizar uma revista com a importância da ESA no cenário nacional é árdua e encontra resistências legítimas, que não podem ser desconsideradas. Internacionalizar é muito mais que publicar manuscritos na língua inglesa; envolve abrir as fronteiras da ESA para divulgação científica aberta ao público internacional, incluindo seu corpo/conselho editorial e quadro de revisores. A maior resistência à internacionalização da ESA advém da sua maior virtude, ou seja, sua importância e reconhecimento no contexto brasileiro.

Dessa forma, os Cadernos Técnicos ESA foram uma saída construída pelo conjunto da ABES, diretoria e corpo editorial da ESA, que oportuniza a divulgação a disseminação de conhecimento voltados aos problemas técnicos nacionais, sem conflitar com o movimento de internacionalização científica da ESA. Afortunadamente, o lançamento dos cadernos técnicos foi abrilhantado pela parceria com o INCT ETEs Sustentáveis, por meio da divulgação de contribuição técnico-científica de alto nível e de extrema relevância ao contexto brasileiro. Nos orgulha fazer parte desse novo marco para a ESA!

Rodrigo Moruzzi
Editor Geral – ESA

André Bezerra dos Santos
Editor Geral Adjunto – ESA

*Editorial publicado nos Cadernos Técnicos Eng Sanit Ambient, v1 n1, 2021, <https://doi.org/10.5327/276455760101001>.

INCT ETEs Sustentáveis*

Prezados leitores,

O INCT ETEs Sustentáveis foi criado em 2017 com o intuito de se tornar um centro de referência para questões relacionadas ao tratamento de esgoto sanitário, de forma a contribuir para a promoção de mudanças estruturais e estruturantes por meio da capacitação profissional, do desenvolvimento de soluções tecnológicas apropriadas às diversas realidades nacionais, da construção e transmissão de conhecimento para a sociedade, órgãos governamentais e empresariais.

As estações convencionais de tratamento de esgoto, de maneira geral, apresentam fluxogramas de tratamento que consideram o lançamento do efluente tratado em algum corpo d'água receptor e, portanto, são concebidas levando-se em consideração apenas a legislação de proteção das coleções hídricas. Se adequadamente projetadas, construídas e operadas, podem alcançar elevadas eficiências de remoção de matéria orgânica, nutrientes e patógenos, cumprindo o seu papel principal de controle da poluição da água. No entanto, essa não é a situação usual no Brasil, onde a maioria das estações apresenta algum tipo de problema operacional, que resulta na elevação dos custos do tratamento, na perda de eficiência e no não cumprimento da legislação ambiental. Ademais, os subprodutos sólidos (lodo e espuma) e gasosos (notadamente biogás) gerados durante o tratamento apresentam rotas de destinação final que usualmente são os aterros sanitários e a queima para a atmosfera. Embora sejam rotas de destinação de subprodutos aceitas no Brasil, sabidamente não são as mais adequadas, face aos impactos ambientais que podem ser causados na atmosfera, no solo e nas águas subterrâneas. Ainda, é de conhecimento amplo que os subprodutos do tratamento apresentam elevado potencial de aproveitamento, mas os esforços nesse sentido são incipientes e, quando realizados, ocorrem de forma desarticulada, normalmente abordando poucas das possibilidades existentes.

Em 4 anos de atuação, o INCT ETEs Sustentáveis desenvolveu pesquisas básicas e aplicadas visando propiciar o desenvolvimento de sistemas integrados e sustentáveis de tratamento de esgoto, com recuperação e valoração dos subprodutos do tratamento. Os resultados das pesquisas desenvolvidas no âmbito do Instituto, em adição à consolidação do conteúdo já existente, possibilitaram a elaboração de cerca de 50 notas técnicas, com tópicos relacionados ao aproveitamento e utilização dos subprodutos gerados a partir do tratamento de esgoto, além de maior eficiência e melhoria dos processos. A partir da parceria firmada entre a ESA e o INCT ETEs Sustentáveis, de forma a ampliar o alcance dos conteúdos e estabelecer melhor integração da academia com profissionais e empresas do setor de saneamento ambiental, essas notas técnicas foram agrupadas em 8 cadernos técnicos de acordo com a temática, a fim de apresentar de forma consolidada e integrada o conteúdo produzido.

Esperamos que a publicação via cadernos técnicos, com ilustrações didáticas e linguagem menos acadêmica, possibilite a efetiva transmissão e apropriação do conhecimento pelos profissionais que atuam no setor. Fica nossa forte expectativa de que o conhecimento disponibilizado possa induzir as transformações necessárias na nossa área, com reflexos na melhoria da gestão, dos projetos, da construção e da operação e manutenção dos sistemas de esgotamento sanitário. Enfim, que o grande esforço empreendido por mais de 100 colegas (autores, coautores, revisores e validadores das diversas notas técnicas), aos quais agradeço imensamente, possa contribuir para a melhoria da sustentabilidade do saneamento, notadamente na área de esgotamento sanitário. Valeu a pena, pessoal!

Boa leitura!

Carlos Augusto de Lemos Chernicharo
Coordenador Geral – INCT ETEs Sustentáveis

*Editorial publicado nos Cadernos Técnicos Eng Sanit Ambient, v1 n1, 2021, <https://doi.org/10.5327/276455760101002>.

Parte A: Higienização e uso de lodo de esgoto no solo

Nota Técnica 1 – Tópicos de interesse

Part A: Sanitization and use of sewage sludge in soil
Technical Note 1 – Topics of interest

**Kenia K. Barros¹, Carlos Augusto de Lemos Chernicharo², Cleverson Vitório Andreoli³,
Lucas de Almeida Chamhum-Silva⁴, Simone Bittencourt⁵, Mario Takayuki Kato^{6*}**

RESUMO

Estações de tratamento de esgoto (ETEs) geram subprodutos sólidos que precisam ser gerenciados de forma segura para não comprometer o meio ambiente e a saúde da população. Dentre estes subprodutos, destaca-se o lodo gerado nas unidades de tratamento primário, biológico e físico-químico, os quais concentram boa parte dos poluentes e contaminantes removidos durante o tratamento do esgoto. Todavia, o lodo é também um reservatório de compostos que podem ser recuperados ou reutilizados (p. ex.: matéria orgânica, fósforo e nitrogênio), os quais são de interesse agrônomo e para a recuperação de áreas degradadas. Esta nota técnica (NT), a primeira da coletânea "Valorização e gerenciamento dos subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo de esgoto em solo", apresenta tópicos de interesse relacionados ao gerenciamento moderno do lodo gerado nas ETEs, com ênfase nos aspectos legais e nas formas de tratamento para sua transformação em bio sólido para uso em solos. As demais NTs que integram a referida coletânea aprofundam os tópicos abordados de forma sucinta nesta primeira NT.

Palavras-chave: legislação; estabilização alcalina; higienização térmica; compostagem; uso agrônomo; recuperação de áreas degradadas

ABSTRACT

Sewage treatment plants (STPs) generate solid by-products that need to be managed safely so as not to compromise the environment and public health. Among these by-products, of special interest is the sludge generated in the primary, biological and physical-chemical treatment units, which concentrates a large amount of the pollutants and contaminants removed during sewage treatment. However, the sludge is also a reservoir of compounds that can be recovered or reused (e.g.: organic matter, phosphorus, and nitrogen), which are of agronomic interest and can be used for the recovery of degraded areas. This technical note (TN), the first of the collection "Valorization and management of solid by-products of sewage treatment. Part A: Sanitization and use of sewage sludge in soil", presents topics of interest related to modern management of the sludge generated in STPs, with emphasis on the legal aspects and forms of treatment for its transformation into biosolid for use in soils and other possibilities. The other TNs that are part of this collection deepen the topics briefly addressed in this first TN.

Keywords: legislation; alkaline stabilization; thermal hygienization; composting; agronomic use; recovery of degraded area.

¹Engenheira Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestre e Doutora em Tecnologia Ambiental pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Professora Associada do Núcleo de Tecnologia do Centro Acadêmico do Agreste da UFPE (Campus Caruaru PE). Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

²Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade de Newcastle upon Tyne - UK. Professor titular aposentado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG. Coordenador do INCT ETEs Sustentáveis.

³Engenheiro Agrônomo, Mestre em Ciências do Solo e Doutor em Meio Ambiente e Desenvolvimento pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Professor do Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade do Instituto Superior de Administração e Economia do Mercosul (ISAE). Diretor da Consultoria e Engenharia Ambiental (CEA). Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

⁴Engenheiro Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

⁵Engenheira Agrônoma, Mestre em Agronomia e Doutora em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela UFPR. Profissional da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). Professora do Curso de Gestão Ambiental da Faculdade Educacional da Lapa (FAEL).

⁶Engenheiro Civil pela UFPR. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (EESC-USP). Doutor em Tecnologia Ambiental e Ciências da Agricultura pela Universidade Agrícola de Wageningen, Holanda. Professor Titular do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UFPE. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

***Endereço para correspondência:** Avenida Acadêmico Hélio Ramos, s/n - Universidade Federal de Pernambuco - Laboratório de Saneamento Ambiental - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Cidade Universitária. Recife, PE. CEP: 50740-530. E-mail: mario.kato@ufpe.br

1. INTRODUÇÃO

O tratamento de esgoto sanitário produz uma variedade de subprodutos sólidos que, caso não sejam adequadamente gerenciados, podem causar uma série de problemas, como geração de odores, atratividade de vetores e impactos de diferentes graus de magnitude sobre o meio ambiente e a saúde pública. Esses subprodutos são gerados nas diferentes unidades que integram uma estação de tratamento de esgoto (ETE), conforme ilustrado na **Figura 1**. Os subprodutos sólidos gerados na etapa de tratamento preliminar são usualmente destinados para aterros sanitários, muito embora determinados constituintes presentes no esgoto possam ser recuperados nesta etapa do tratamento (p. ex.: areia e celulose). De particular interesse para essa nota técnica (NT) são os subprodutos sólidos gerados nas unidades de tratamento primário e biológico: (i) o lodo primário; e (ii) o lodo secundário (ou biológico), ou simplesmente **lodo de esgoto**.

O lodo de esgoto pode ser gerado em unidades de tratamento unifamiliar (p. ex.: tanque séptico e filtro anaeróbio - **Figura 1a**), em sistemas de lagoas de estabilização (p. ex.: lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa - **Figura 1b**), em sistemas de lodos ativados (p. ex.: decantador primário e decantador secundário - **Figura 1c**), em sistemas combinados anaeróbio/aeróbio (p. ex.: reator UASB seguido de filtro biológico percolador - **Figura 1d**).

Até recentemente, o lodo produzido nas ETEs era simplesmente considerado um resíduo na visão dos gestores, cujo gerenciamento representava apenas custos, notadamente com o seu tratamento, transporte e disposição final. Esse entendimento ainda predomina na grande maioria das ETEs brasileiras, mas um grande esforço vem sendo feito nos últimos anos no sentido de melhor entender (e explorar) as várias possibilidades de valorização desse subproduto do tratamento de esgoto, tendo em vista sua constituição bastante favorável em termos de nutrientes e matéria orgânica.

Nesse contexto, o aproveitamento do lodo de esgoto como fertilizante e/ou condicionador de solos tem se tornado uma alternativa de grande interesse técnico e econômico em todo o mundo para manejo desse subproduto do tratamento de esgoto. Cabe ressaltar que

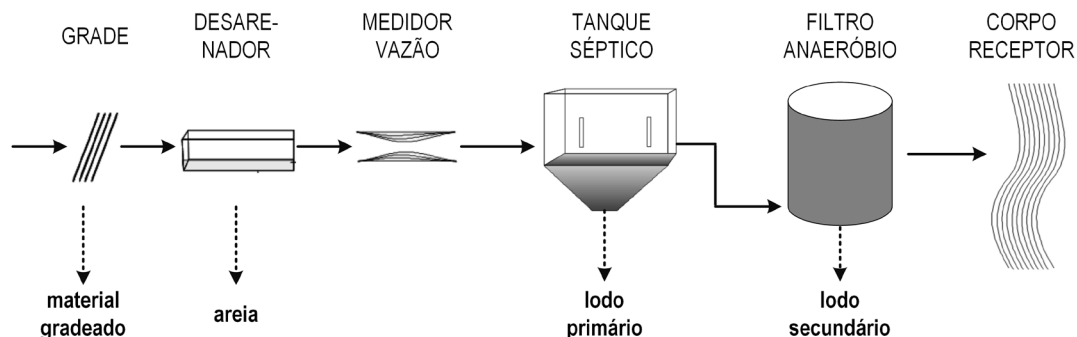
para efetivação de tais usos, o lodo de esgoto deve ser submetido a processos de beneficiamento ou tratamento, sendo transformado em biossólido, um produto seguro do ponto de vista ambiental e de saúde pública e, portanto, passível de aplicação em solos. Essa rota de destinação final do lodo constitui um dos principais pilares do tratamento sustentável dos esgotos, pois proporciona, ao mesmo tempo, a reciclagem de nutrientes essenciais às plantas e a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, devido ao alto teor de matéria orgânica presente no lodo (KIRCHMANN *et al.*, 2017; BATISTA e SOUZA, 2020). Complementarmente, pode ainda possibilitar ganhos econômicos, ambientais e sociais.

Essa coletânea de NTs tem por objetivo divulgar conhecimentos consolidados por especialistas do setor acadêmico e prestadores de serviços de saneamento, bem como a produção técnica-científica aplicada ao tema do uso do lodo de esgoto em diversas atividades ligadas à agricultura e à recuperação de áreas degradadas. A contextualização e os tópicos de interesse são discutidos de forma sucinta na presente NT, sendo individualmente detalhados nas NTs subsequentes que integram esta coletânea, intitulada “Valoração e gerenciamento dos subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de esgoto em solo”, como apresentado na **Tabela 1**.

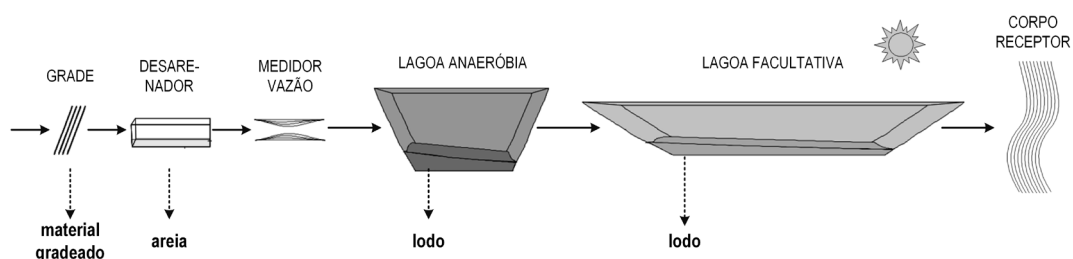
Tabela 1 – Correspondência entre as NTs desta coletânea e os tópicos/técnicas de interesse para o uso de biossólido no solo.

Tópico de interesse	Nota técnica correspondente
Aspectos legais relacionados à utilização de lodo de esgoto no solo	NT 2: Aspectos legais (BITTENCOURT <i>et al.</i> , 2022a)
Higienização de lodo de esgoto visando seu uso no solo	NT 3: Higienização de lodo via compostagem (MATOS <i>et al.</i> , 2022)
	NT 4: Higienização de lodo via estabilização alcalina (ANDREOLI <i>et al.</i> , 2022)
	NT 5: Secagem e higienização térmica de lodo (RIETOW <i>et al.</i> , 2022)
Utilização de lodo de esgoto no solo (agricultura e áreas degradadas)	NT 6: Uso agrícola de biossólido (BITTENCOURT <i>et al.</i> , 2022b)
	NT 7: Uso de biossólido para recuperação de áreas degradadas (CHAMHUM-SILVA <i>et al.</i> , 2022)

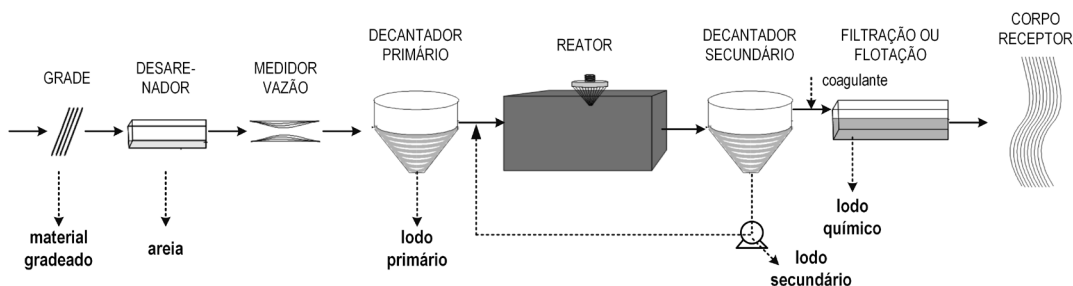
Tanque séptico - Filtro anaeróbio



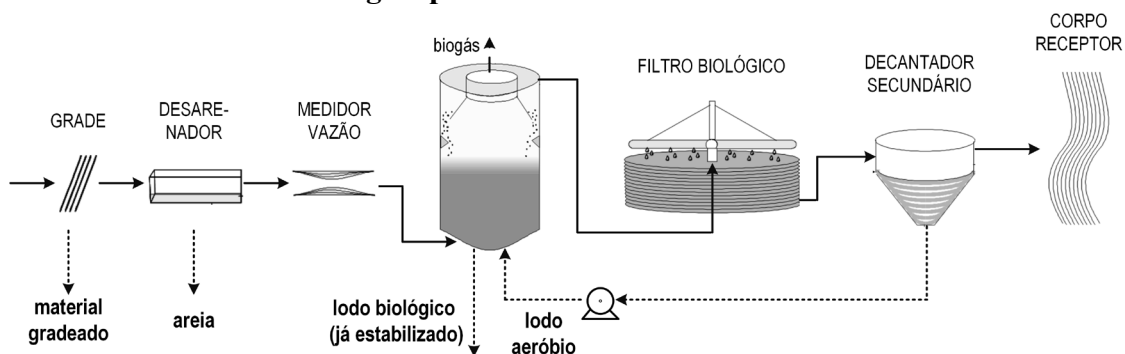
Lagoa anaeróbia - Lagoa facultativa



Lodos ativados com polimento físico-químico



Reator UASB - Filtro biológico percolador



Fonte: adaptado de von Sperling (2014).

Figura 1 – Configuração esquemática de alguns sistemas de tratamento de esgoto, com identificação dos pontos de geração de subprodutos sólidos.

2. FUNDAMENTAÇÃO

O lodo de esgoto é um material que se apresenta em estado semissólido ou líquido pastoso e que concentra boa parte dos poluentes e contaminantes que são removidos durante o tratamento do esgoto. Essas características estão intimamente relacionadas tanto com as condições socioeconômicas e o perfil de saúde da população atendida por coleta de esgoto, quanto com o recebimento ou não de efluentes de origem industrial na rede coletora e, também, com a tecnologia de tratamento empregada (KELESSIDIS *et al.*, 2012; MA *et al.*, 2019; WU *et al.*, 2019; BATISTA e SOUZA, 2020). Além dos constituintes típicos do esgoto sanitário (matéria orgânica, macro e micronutrientes e microrganismos patogênicos), o lodo pode conter substâncias químicas indesejáveis, notadamente quando efluentes industriais são tratados conjuntamente com o esgoto doméstico. Exemplos de substâncias químicas que podem conferir características indesejáveis ao lodo englobam metais pesados e poluentes orgânicos persistentes (POPs). Assim como se deve dar atenção aos microrganismos patogênicos, os riscos associados a essas substâncias químicas também devem ser adequadamente gerenciadas, perpassando pelo monitoramento do lodo, conforme detalhado na NT 2 desta coletânea (BITTENCOURT *et al.*, 2022a).

Por outro lado, o lodo de esgoto também é um reservatório de compostos preciosos que podem ser recuperados ou reutilizados, como matéria orgânica, carbono (C), fósforo (P), nitrogênio (N), ou mesmo proteínas, os quais são de interesse agrônômico, para uso como fertilizante e/ou condicionador de solos, e para a recuperação de áreas degradadas (KACPRZAK *et al.*, 2017), conforme tratado nas NTs 6 e 7 desta coletânea (BITTENCOURT *et al.*, 2022b; CHAMHUM-SILVA *et al.*, 2022). Dessa forma, por apresentar características variadas, o manejo seguro do lodo é considerado uma tarefa complexa, pois requer uma gestão adequada e ambientalmente aceita antes da sua destinação final, a fim de evitar problemas ambientais e de saúde pública (YANG *et al.*, 2020).

O gerenciamento dos subprodutos sólidos de uma ETE é um tema desafiador, tanto para países desenvolvidos, quanto para aqueles em desenvolvimento. Isto é devido tanto ao aumento do número de ETEs e, consequentemente, ao

acréscimo da produção desses subprodutos, quanto à presença de contaminantes e poluentes de interesse ambiental (SPINOSA *et al.*, 2011; BATISTA e SOUZA, 2020). Em geral, para a disposição segura do lodo no solo, recorre-se à regulamentação de uso e disposição final desse subproduto, estabelecendo critérios de tratamento e utilização, a fim de minimizar os riscos associados principalmente à presença de patógenos e substâncias químicas (SERRAT *et al.*, 2011).

3. ASPECTOS LEGAIS RELACIONADOS AO GERENCIAMENTO DO LODO

O gerenciamento do lodo de esgoto é uma atividade complexa e de grande importância nas ETEs, por extrapolar seus limites e envolver outros setores da sociedade e do saneamento básico. Além disso, o descarte inadequado desse subproduto acarreta problemas que podem comprometer o meio ambiente e, consequentemente, a saúde humana e animal. Diante desses fatos, faz-se necessário instituir dispositivos legais que disciplinem as condições adequadas de gerenciamento desse subproduto, notadamente no que tange ao tratamento, monitoramento das características do biossólido (lodo de esgoto pós-beneficiamento) e sua destinação final. No Brasil, o principal instrumento legal relacionado ao uso de biossólido no solo é a Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (BRASIL, 2020).

Nas etapas de gerenciamento do lodo produzido nas ETEs, para garantir a segurança do seu uso em solos, recomenda-se que haja um controle eficiente sobre a qualidade do tratamento e o teor de contaminantes biológicos e químicos presentes no lodo. Segundo Santos (2001), para se garantir a segurança ambiental e sanitária, o uso do biossólido deve ser apoiado por uma legislação que regule essa etapa final do gerenciamento do lodo produzidos nas ETEs, a fim de estabelecer quais contaminantes devem ser monitorados, quais as concentrações que serão toleradas, em função de cada uso, qual a frequência de avaliação técnica do biossólido e quais as alternativas de disposição que serão permitidas em função da qualidade do material. Como o uso do biossólido na agricultura é considerado uma das formas mais sustentáveis de destinação

final, Ilhenfeld *et al.* (1999) relatam que a legislação que regulamenta o uso agrícola do bio sólido deve prever uma série de exigências que garanta a segurança do produtor rural, do consumidor e do meio ambiente. Na **Tabela 2** é apresentada uma descrição sucinta de algumas normas vigentes no Brasil relacionadas ao uso de lodo no solo, à classificação e à definição do lodo *in natura* e do produto resultante do seu tratamento.

Tabela 2 – Aspectos legais associados ao lodo de esgoto.

Normas brasileiras	Aplicação
ABNT NBR 10.004/2004	<i>"Esta Norma classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente."</i> Segundo os critérios da Norma Brasileira (NBR) 10.004/2004, o lodo gerado em estações de tratamento de esgoto predominantemente doméstico normalmente é classificado como Resíduos Classe II A - não inerte, podendo apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
Lei Federal nº 12.305/2010	<i>"Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis."</i> Esta Lei classifica o lodo como um resíduo do serviço público de saneamento básico.
Resolução CONAMA nº 498/2020	<i>"Estabelece critérios e procedimentos para produção e aplicação de bio sólidos em solos, e dá outras providências."</i> Define lodo de esgoto como um resíduo gerado no processo de tratamento de esgoto sanitário, por processos de decantação primária, biológico ou químico. Considera que o bio sólido é um produto do tratamento do lodo de esgoto sanitário que atende aos critérios microbiológicos e químicos estabelecidos na Resolução, estando, dessa forma, apto a ser aplicado em solos.

Nota: alguns estados possuem resoluções específicas para usos de lodo.

Fonte: ABNT (2004); Brasil (2010; 2020)

4. TRATAMENTO DO LODO

Estima-se que o gerenciamento do lodo pode representar de 20% a 60% dos custos operacionais de uma ETE. Por este motivo, seu tratamento é uma preocupação que se restringe, em muitos casos, somente à estabilização e ao desaguamento, para se atingir um teor de sólidos totais na faixa de 15% a 40%, visando quase que exclusivamente a redução dos volumes de lodo antes da sua retirada da área da ETE. No entanto, esta prática pode acarretar muitas

vezes em negligência quanto às etapas de planejamento e execução do destino desse subproduto (MOREIRA *et al.*, 2019). Assim, para um descarte seguro do lodo de esgoto, três aspectos precisam ser considerados: (i) o nível de estabilização da matéria orgânica, (ii) os teores de metais pesados e (iii) o grau de patogenicidade do lodo (CASSINI *et al.*, 2003; KACPRZAK *et al.*, 2017). Ademais, para alcançar níveis aceitáveis desses aspectos para uma destinação segura, é preciso que o lodo passe por uma série de etapas de tratamento, as quais estão descritas resumidamente na **Tabela 3**.

Muito embora a etapa de higienização do lodo esteja contemplada na Tabela 3, claramente esta é uma etapa raramente utilizada nas ETEs brasileiras, uma vez que, na grande maioria dos casos, o lodo não é transformado em bio sólido para possibilitar o seu aproveitamento no solo. Todavia, é grande a expectativa de que a recém aprovação da Resolução CONAMA nº 498/2020 (ver item 3, anterior, e análise detalhada na NT 2 desta coletânea – BITTENCOURT *et al.*, 2022a), motive os Prestadores de Serviços de Saneamento a incluir a etapa de higienização do lodo, integrada a uma Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL), ao fluxograma de tratamento da fase sólida de suas ETEs. Seguramente, essa alteração no fluxograma das ETEs deverá possibilitar ganhos econômicos (p. ex.: redução dos custos com transporte e disposição final do lodo), ambientais (p. ex.: redução de emissão de gases de efeito estufa – ver NT 7 da coletânea “Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto - Parte B: Avanços nas técnicas de controle de emissões gasosas em ETES com reatores anaeróbios” – BIANCHETTI *et al.*, 2021) e sociais (p. ex.: incentivo a pequenos produtores rurais), contribuindo de forma expressiva para a maior sustentabilidade do tratamento de esgoto em nosso país. O fluxograma apresentado na **Figura 2** mostra as principais etapas e alternativas para o gerenciamento dos subprodutos sólidos do tratamento de esgoto, com destaque para a transformação do lodo em bio sólido para uso no solo.

Conforme mostrado na Figura 2, a transformação do lodo em bio sólido, e sua posterior utilização no solo, demanda a implantação de uma UGL, com sua

Tabela 3 – Principais etapas de tratamento do lodo gerado em ETEs.

Tratamento	Descrição
Adensamento	Processo utilizado para remoção de umidade e, consequente, redução do volume da massa de lodo, facilitando assim as etapas subsequentes do seu tratamento. É uma etapa mais aplicada aos lodos primários e naqueles gerados pelos sistemas de lodos ativados e filtros percoladores. Os principais processos são: adensamento por gravidade , aplicado em lodos primários e mistos; flotação por ar dissolvido , utilizado em lodos ativados; centrifugação , aplicada em lodos biológicos aeróbios ou anaeróbios.
Estabilização	Etapla indicada para remoção da matéria orgânica e consequente redução de odores. Os processos de estabilização podem ser divididos em: biológico , por digestão aeróbia ou anaeróbica; químico , por oxidação química da matéria orgânica, através da adição de produtos químicos; térmico , por adição de calor sobre a fração volátil do lodo.
Condicionamento	Etapla de preparação para a desidratação, realizada predominantemente pela adição de produtos químicos (os mais usados são a cal e o cloreto férrico) ou tratamento térmico (atualmente ainda limitado). O principal objetivo do condicionamento é aumentar o tamanho das partículas de sólidos, por meio das fases de coagulação e floculação.
Desaguamento	Etapla de remoção de umidade e redução do volume de lodo, produzindo um material com comportamento mecânico próximo ao dos sólidos. O desaguamento pode ser realizado por meios naturais, mecânicos ou térmicos. Os meios naturais fazem o uso da evaporação e da percolação com principais mecanismos de remoção da água, e são realizados em lagoas de lodo ou leitos de secagem. Os meios mecânicos são baseados em mecanismos como a filtração, a compactação ou a centrifugação para acelerar o desaguamento do lodo. Na modalidade mecanizada, são utilizados filtros prensa, filtros a vácuo, prensas desaguadoras e centrifugas. Os meios térmicos são empregados para desaguamento, mas também servem simultaneamente para a estabilização da matéria orgânica e higienização do lodo, com o uso de calor em geral produzido por biogás de reatores anaeróbios da própria ETE.
Higienização	A higienização tem o objetivo de eliminar ou reduzir a concentração de organismos patogênicos e se torna necessária para se transformar o lodo em um biossólido para uso agrícola ou recuperação de áreas degradadas. Os processos de higienização combinam mecanismos térmicos, químicos e/ou biológicos para minimizar o grau de patogenicidade do lodo. Os métodos de higienização mais conhecidos e considerados eficazes na remoção de microrganismos patogênicos são a compostagem, caleação e secagem térmica do lodo.

Fonte: Passamani e Gonçalves (1999); Pinto (2001); Tchobanoglous et al. (2003); Kacprzak et al. (2017).

respectiva unidade de higienização. Na NT 2 desta coletânea (BITTENCOURT et al., 2022a), UGL é definida como a unidade que realiza o gerenciamento para transformar o lodo gerado por uma ou mais ETEs em biossólido. O principal objetivo da unidade de higienização de lodo é reduzir ou até eliminar microrganismos patogênicos (vírus, bactérias, protozoários e ovos de helmintos), sendo estas as principais vias que têm sido utilizadas: (i) química; (ii) térmica; ou (iii) biológica. Destas, a **compostagem**, a **caleação** e a **secagem térmica** do lodo são as formas mais simples e econômicas, porém, eficazes para eliminar e/ou inviabilizar microrganismos patogênicos (MENDONÇA, 2017). Estas três alternativas de higienização do lodo para transformação em biossólido são ilustradas de forma esquemática na **Figura 3** e descritas nos parágrafos seguintes. Importante ressaltar que a higienização não é um processo de desinfecção, ela busca reduzir a patogenicidade do lodo a níveis aceitáveis pela legislação, de acordo as exigências de cada utilização, a fim de não comprometer a saúde dos usuários (PINTO, 2001).

A higienização do lodo por meio da **compostagem** é um processo biológico que decorre da decomposição da matéria orgânica, envolvendo a ação de vários grupos de microrganismos. Durante a compostagem, a degradação aeróbia da matéria orgânica proporciona a elevação natural da temperatura, chegando a valores entre 60 e 65 °C nos primeiros dias do processo. O aquecimento do lodo, provocado pelo metabolismo microbiano, gera uma fase termofílica que, associada ao tempo de exposição da mistura às altas temperaturas, é suficiente para inviabilizar ou reduzir os patógenos presentes no lodo. Os constituintes orgânicos do lodo são convertidos a substâncias húmicas, estabilizadas através dos processos de mineralização e humificação, com uma significativa redução do volume. O composto resultante do processo pode ser utilizado como fertilizante ou condicionador de solo por causa da alta concentração de nutrientes e matéria orgânica. Para realizar a compostagem, o lodo pode ser misturado a resíduos orgânicos ricos em C e pobres em N, como por exemplo os resíduos vegetais, para equilibrar a relação C/N da mistura, a fim de que esta fique entre os valores de 25 e 35, considerados ótimos para que a compostagem ocorra em

condições ideais (PASSAMANI e GONÇALVES, 1999; WONG e FANG, 2000; LI *et al.*, 2001; MENDONÇA, 2017). A abordagem detalhada da técnica de higienização do lodo por meio da compostagem é apresentada na NT 3 desta coletânea (MATOS *et al.*, 2022).

A higienização do lodo pela via **estabilização alcalina (caleação)** é um dos métodos mais simples para eliminar patógenos, além de atuar também na estabilização da matéria orgânica e na desodorização do lodo.

O processo consiste em misturar cal (virgem ou hidratada) ao lodo, o que resulta no aumento do pH da mistura a valores entre 9 e 13, a depender da dosagem de cal em relação ao peso seco, e das características físico-químicas do lodo de esgoto. O pH alcalino deve permanecer por no mínimo 72 horas, para que o meio se torne impróprio à sobrevivência e ao desenvolvimento dos patógenos, inativando ou destruindo a maior parte deles (PASSAMANI e GONÇALVES, 1999; MENDONÇA, 2017).

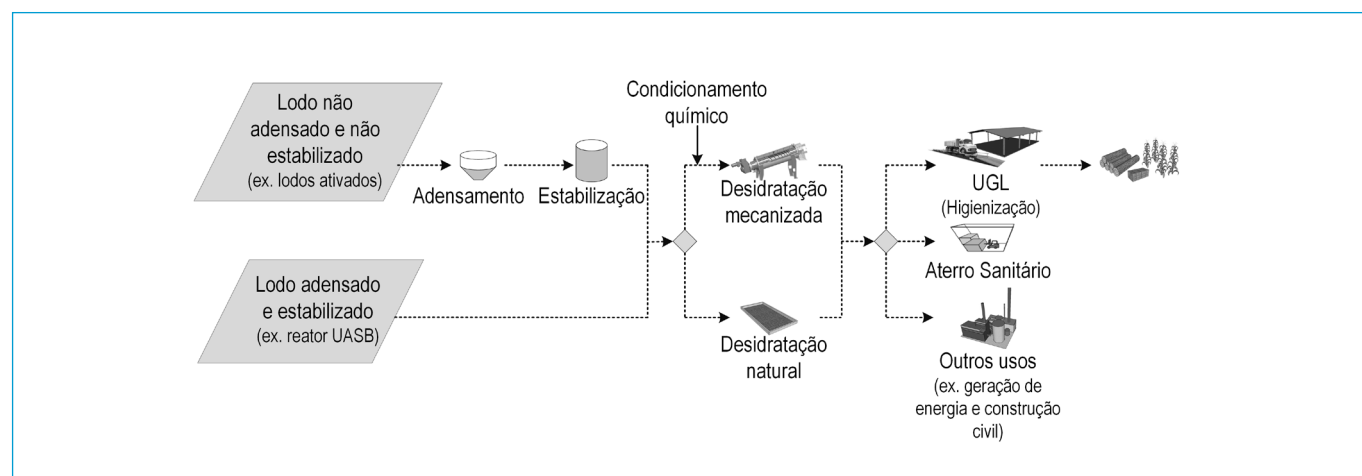


Figura 2 – Principais etapas e alternativas para o gerenciamento do lodo gerado em ETEs.

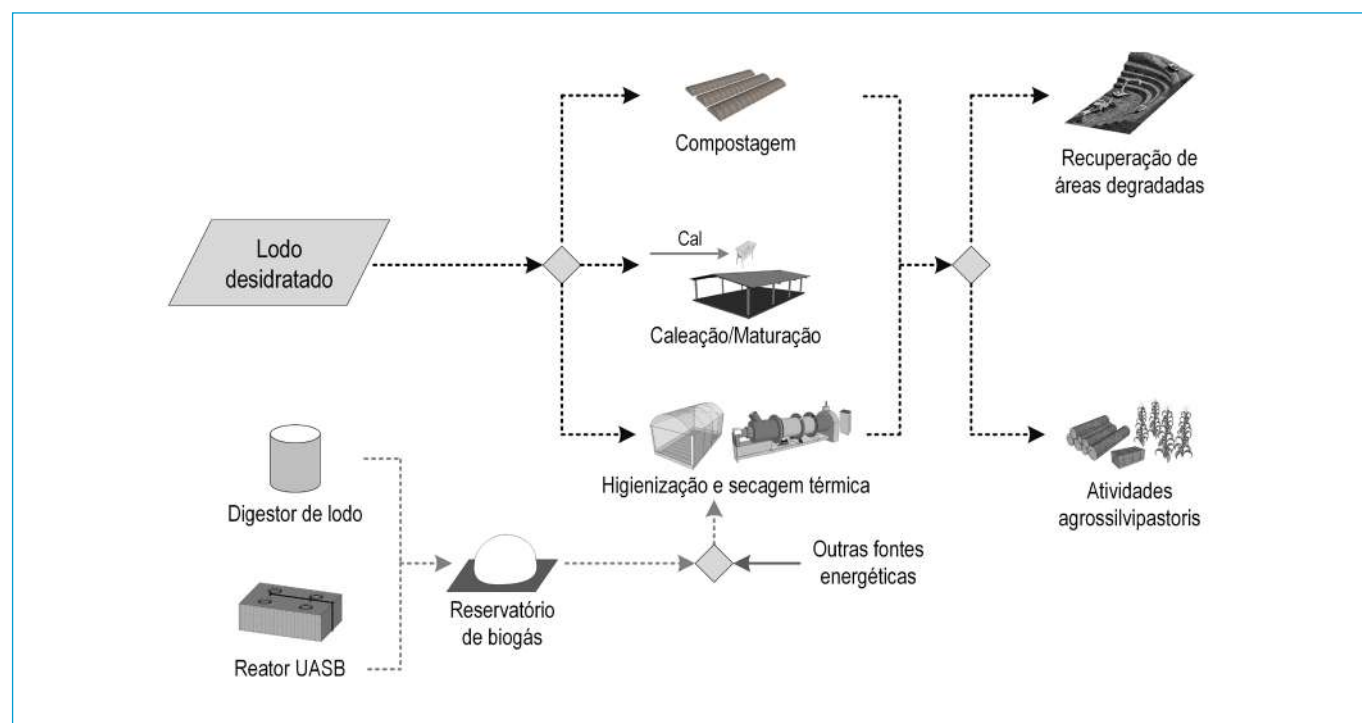


Figura 3 – Ilustração esquemática de alternativas de higienização de lodo de esgoto: caleação; térmica; e compostagem.

Concentrações de cal virgem variando de 30 a 50% de cal, em relação à massa de sólidos totais contida no lodo, são suficientes para garantir níveis aceitáveis de remoção de patógenos presentes no lodo. A abordagem detalhada da técnica de higienização do lodo via estabilização alcalina é apresentada na NT 4 desta coletânea (ANDREOLI *et al.*, 2022).

Os **mecanismos térmicos** de higienização combinam duas variáveis de controle: tempo e temperatura. Dessa forma, o tempo de permanência do lodo a uma determinada temperatura deve ser suficiente para se atingir a qualidade microbiológica e parasitológica exigida para sua aplicação no solo. Esse processo consiste em submeter o lodo a uma fonte de calor, de modo que a temperatura e o tempo de contato sejam suficientes para promover a eliminação/inativação dos patógenos. A depender do tipo de mecanismo utilizado, pode ocorrer também a secagem térmica (evaporação de parte da umidade do lodo) e a produção de um biossólido com aspecto granular, com teor de sólidos de aproximadamente 80%, o que representa uma extrema redução do volume a ser enviado para destinação final (p. ex.: uso agrícola). A abordagem detalhada das principais alternativas para secagem e higienização térmica de lodo, em ETEs de diferentes portes, é apresentada na NT 5 desta coletânea (RIETOW *et al.*, 2022).

5. USO DO BIOSSÓLIDO EM SOLOS E OUTRAS POSSIBILIDADES

O lodo de esgoto, após ser submetido ao processo de beneficiamento e desde que não tenha contaminantes que comprometam seu uso em solos, passa a ser denominado biossólido. Na perspectiva de aproveitamento em solos, o biossólido pode ser aplicado tanto em áreas agrícolas (incluindo pastagens e silvicultura) quanto em áreas degradadas. Em que pese as semelhanças entre as duas formas de aproveitamento, é de suma importância a diferenciação entre ambas, especialmente no que tange aos critérios e condições que devem ser observados para cada um desses casos, conforme estabelecido na Resolução CONAMA nº 498/2020.

O **uso agrícola** do biossólido é considerado uma forma benéfica de reciclagem de nutrientes e matéria orgânica, que possibilita a redução do uso de fertilizantes minerais.

A prática da adubação com biossólido tem sido discutida recorrentemente nas últimas décadas, a fim de avaliar os resultados decorrentes da sua aplicação ao solo (AKRIVOS *et al.*, 2000; HOSPIDO *et al.*, 2010; CUCINA *et al.*, 2019). É inegável que o produto resultante do beneficiamento do lodo contenha elementos como C, N, P e potássio (K) que, do ponto de vista agrônomo, são necessários às plantas, por contribuir para melhoria tanto da fertilidade do solo, como o desenvolvimento das mesmas, aumentando a produtividade das culturas (SHAFII *et al.*, 2019). Todavia, cabe ressaltar que mesmo após o beneficiamento, o biossólido ainda possui substâncias químicas potencialmente causadoras de impactos negativos ao meio ambiente e à saúde pública. Além das substâncias químicas, os próprios nutrientes presentes no biossólido podem figurar como poluentes, caso sua aplicação não seja realizada da forma adequada (p. ex.: quantidade aplicada além da capacidade de extração da planta).

Nesse sentido, na perspectiva de uso agrícola, a dosagem de biossólido deve ser pautada tanto pela necessidade nutricional das plantas, quanto pela capacidade do sistema solo-planta em assimilar as substâncias químicas aportadas via biossólido. Logo, a Resolução CONAMA nº 498/2020 define os padrões de qualidade do biossólido e do solo submetido à aplicação desse subproduto, considerando a possibilidade de aplicações recorrentes, assegurando, assim, que a quantidade aportada de forma pontual (determinada aplicação) e acumulada (ao longo de aplicações sucessivas) não causará impactos negativos. O uso agrícola de biossólido é discutido detalhadamente na NT 6 desta coletânea (BITTENCOURT *et al.*, 2022b)

Na perspectiva de **recuperação de áreas degradadas**, o aspecto de maior interesse associado ao uso de biossólido consiste na elevação do teor de matéria orgânica no solo. Assim, o biossólido atua como agente condicionante de solos, promovendo melhorias principalmente nas propriedades físicas do solo (porosidade, formação e estabilidade de agregados, retenção de água etc.) e fornecendo condições favoráveis à recomposição vegetal (DOURADO *et al.*, 2020). Ademais, a parcela de macro e micronutrientes aportada juntamente com a matéria orgânica, a qual é liberada gradualmente, também contribui para o

desenvolvimento de plantas na área degradada. Como a finalidade principal da aplicação de biossólido em áreas degradadas não é a produção vegetal (caso do uso agrícola), mas sim o condicionamento do solo, a dosagem do subproduto é definida a partir do teor de matéria orgânica observado no solo e o teor que se pretende alcançar. Essa diferença na concepção do uso do biossólido implica em variação nos padrões de qualidade estabelecidos na Resolução CONAMA nº 498/2020, se comparado ao uso agrícola. Informações mais detalhadas sobre o assunto estão descritas na NT 7 desta coletânea (CHAMHUM-SILVA *et al.*, 2022).

Outras opções de aproveitamento do lodo que não diretamente em solos incluem os processos térmicos (p. ex.: incineração, pirólise) e usos na indústria da construção civil (p. ex.: produção de cimento e uso como agregado). De forma geral, estas opções são mais complexas e demandam maiores investimentos de implantação e operação, comparativamente com o uso em solos, embora sejam extremamente compactas – aspecto importante em locais com reduzida disponibilidade de área. Especificamente no caso da construção civil, a maioria dos estudos indica proporções de 4% a 7% de lodo, em relação aos outros insumos, como os mais satisfatórios; outros indicam uma dosagem máxima de substituição de areia por lodo de 5%, para a produção específica de concreto não-estrutural. Entretanto, o uso das cinzas de lodo de ETEs deve ser cuidadosamente analisado, de acordo com as normas técnicas específicas para a produção de materiais de construção civil, para garantir a eficácia, segurança e aplicabilidade dos produtos gerados (LYNN *et al.*, 2015; RAMIREZ *et al.*, 2017).

Além destas, cumpre citar alternativas de disposição final como aterro sanitário e disposição oceânica, nas quais o lodo de esgoto é tratado sob a ótica de resíduo e não recurso. Apesar de ainda existentes, tanto em países desenvolvidos como em desenvolvimento, são opções cada vez mais limitadas ou até banidas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar do lodo gerado nas ETEs concentrar boa parte dos poluentes e contaminantes presentes no esgoto bruto, em sua composição apresenta também

compostos preciosos que podem ser recuperados e/ou reutilizados em diferentes setores da economia. Dessa forma, a transformação do lodo de esgoto em um biossólido para uso seguro em solos tem se tornado uma alternativa de grande interesse técnico e econômico em todo o mundo. Essa prática constitui um dos principais pilares do tratamento sustentável do esgoto, pois proporciona, ao mesmo tempo, a reciclagem de nutrientes essenciais às plantas e a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, devido ao alto teor de matéria orgânica presente no lodo. Complementarmente, pode ainda possibilitar ganhos econômicos, ambientais e sociais.

Surpreendentemente, em que pese a ausência de inventários atualizados e públicos acerca da geração e destinação final de lodo de esgoto no Brasil, a percepção geral é de que os aterros sanitários consistem na principal (e mais cômoda) alternativa de disposição, mesmo o país sendo um dos principais produtores agrícolas do mundo, importador de fertilizantes e com elevada disponibilidade de área.

Nesta NT, a primeira desta coletânea, são apresentados tópicos de interesse relacionados ao gerenciamento moderno e seguro do lodo de esgoto, com ênfase nos aspectos legais e nas formas de tratamento para sua transformação em biossólido para uso em solos e outras possibilidades. As demais NTs que integram esta coletânea aprofundam os seguintes tópicos relacionados ao gerenciamento do lodo: aspectos legais; higienização por compostagem; higienização por estabilização química (caleação); secagem e higienização térmica; uso agrícola de biossólido; e recuperação de áreas degradadas.

Com as informações contidas nesta coletânea de NTs, espera-se contribuir para melhorar o entendimento das diferentes etapas do gerenciamento do lodo nas ETEs, assim como das possibilidades de uso sustentável do biossólido em várias atividades ligadas à agricultura e à recuperação de áreas degradadas. Incentiva-se os profissionais interessados nesta temática a aprofundarem seus conhecimentos por meio do conteúdo apresentado nas outras seis partes (NTs 2 a 7) que integram esta coletânea.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, da

Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis.

Este trabalho faz parte da série de publicações do INCT ETEs Sustentáveis

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004. 71p.
- AKRIVOS, J.; MAMAI, D.; KATSARA, K.; ANDREADAKIS, A. Agricultural utilization of lime treated sewage sludge. *Water Science and Technology*, v. 42, n. 9, p. 203-210, 2000.
- ANDREOLI, C. V.; BICO, A. K.; BITTENCOURT, S.; PEGORINI, E. S.; POSSETTI, G. R. C.; CERQUEIRA, P. L. W.; RIETOW, J. C.; AISSE, M. M. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo – Nota Técnica 4 - Higienização de lodo via estabilização alcalina. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 45-58, 2022.
- BATISTA, L. F.; SOUZA, M. A. A. Aptidão dos lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal para condicionamento, utilização e disposição final. *Revista DAE*, v. 68, n. 226, p. 179-195, 2020.
- BIANCHETTI, F. J.; BRANDT, E. M. F.; SANTOS, H. A.; CHERNICHARO, C. A. L. Valoração e gerenciamento de subprodutos gasosos do tratamento do esgoto. Parte B: Avanços nas técnicas de controle de emissões gasosas em ETEs com reatores anaeróbios – Nota Técnica 7 - Emissão e compensação de gases de efeito estufa. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 1, n. 2, p. 91-105, 2022.
- BITTENCOURT, S.; MATOS, A. T.; SILVA, B. S.; MIKI, M. K.; BASTOS, R. K. X. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo – Nota Técnica 2 - Aspectos legais. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 17-29, 2022a.
- BITTENCOURT, S.; MATOS, A. T.; SILVA, B. S.; OLIVEIRA, F. C.; CHAMHUM-SILVA, L. A.; MIKI, M. K.; BICO, A. K. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo – Nota Técnica 6 -
- Uso agrícola de biossólido. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 75-87, 2022b.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 480, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Brasília, DF, 2020.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, 2010.
- CASSINI, S. T.; VAZOLLER, R. F.; PINTO, M. T. Introdução. In: Cassini, S. T. (coord.). *Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás*. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro, ABES, RiMA, 2003. p. 1-9.
- CHAMHUM-SILVA, L. A.; SILVA, J. B. G.; OLIVEIRA, L. S.; BORGES, M. N.; LIMA, T. G.; BITTENCOURT, S.; MATOS, A. T. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo – Nota Técnica 7 - Recuperação de áreas degradadas. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 89-101, 2022.
- CUCINA, M.; RICCI, A.; ZADRA, C.; PEZZOLLA, D.; TACCONI, C.; SORDI, S.; GIGLIOTTI, G. Benefits and risks of long-term recycling of pharmaceutical sewage sludge on agricultural soil. *Science of the Total Environment*, v. 695, 133762, p. 1-8, 2019.
- DOURADO, L. R.; DEMOLIN-LEITE, G. L.; SOARES, M. A.; TEIXEIRA, G. L.; SILVA, F. W. S.; SAMPAIO, R. A.; ZANUNCIO, J. C.; LEGASPI, J. C. Ecological indices of phytophagous Hemiptera and their natural enemies on *Acacia auriculiformis* (Fabales: Fabaceae) plants with or without dehydrated sewage sludge application in a degraded area. *PLoS ONE*, v. 15, n. 8, p. 1-9, 2020.
- HOSPIDO, A.; CARBALLA, M.; MOREIRA, M.; OMIL, F.; LEMA, J. M.; FEIJOO, G. Environmental assessment of anaerobically digested

sludge reuse in agriculture: Potential impacts of emerging micropollutants. *Water Research*, v. 44, p. 3225-3233, 2010.

ILHENFIELD, R. G. K.; PEGORINI, E. S.; ANDREOLI, C. V. Fatores Limitantes. In: Fernandes, F. (Coord.). *Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura*. Curitiba, Brasil: Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB), 1999. p. 41-61.

KACPRZAK, M.; NECZAJ, E.; FIJAŁKOWSKI, K.; GROBELAK, A.; GROSSER, A.; WORWAG, M.; RORAT, A.; BRATTEBO, H.; ALMÁS, Á.; SINGH, B. R. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research*, v. 156, p. 39-46, 2017.

KELESSIDIS, A.; STASINAKIS, A. S. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management*, n. 32, p. 1186-1195, 2012.

KIRCHMANN, H.; BÖRJESSON, G.; KÄTTERER, T.; COHEN, Y. From agricultural use of sewage sludge to nutrient extraction: A soil science outlook. *Ambio*, v. 46, p. 143-154, 2017.

LI, G.; ZHANG, F.; SUN, Y.; WONG, J. W. C.; FANG, M. Chemical evaluation of sewage sludge composting as a mature indicator for composting process. *Water, Air & Soil Pollution*, v. 132, p. 333-345, 2001.

LYNN, C.; DHIR, R.; GHATAORA, G.; WEST, R. Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 98, p. 767-779, 2015.

MA, C.; HU, B.; WEI, M.; ZHAO, J.; ZHANG, H. Influence of matured compost inoculation on sewage sludge composting: Enzyme activity, bacterial and fungal community succession. *Bioresource Technology*, v. 294, p. 122165, 2019.

MATOS, A. T.; BORTOLINI, R. L. R.; MORAES, B. A. B. de.; LEITE, W. R. M.; KATO, M. T. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo – Nota Técnica 3 - Higienização de lodo via compostagem. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 31-44, 2022.

MENDONÇA, L. C. Limpeza e destino final dos lodos produzidos nas lagoas de estabilização. In: Mendonça, S. R.; Mendonça, L. C. *Sistemas sustentáveis de esgotos: orientações técnicas para projeto e dimensionamento de redes coletoras, emissários, canais, estações elevatórias, tratamento e reúso na agricultura*. 2ª ed. Revista. São Paulo: Blucher, 2017. p. 271-289.

MOREIRA, S. F.; SANTOS, S. D. O.; SARDINHA, A. S.; PEREIRA JÚNIOR, A. O lodo de ETE como alternativa para a recuperação

do solo em áreas degradadas. *Brazilian Applied Science Review*, v. 3, n. 3, p. 1564-1585, 2019.

PASSAMANI, F. R. F.; GONÇALVES, R. F. Higienização de Lodos de Esgotos. In: Gonçalves, R.F. (Coord.). *Gerenciamento do lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas*. Vitória: Departamento de Hidráulica e Saneamento, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB), 1999. p. 55-59.

PINTO, M. T. Higienização de lodos. In: Andreoli, C. V.; von Sperling, M.; Fernandes, F. (Org.). *Lodo de esgoto: tratamento e disposição final*. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 484 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuais, v. 6)

RAMIREZ, K. G.; POSSAN, E.; DEZEN, B. G. S.; COLOMBO, M. Potential uses of waste sludge in concrete production. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, v. 28, n. 6, p. 821-838, 2017.

RIETOW, J. C.; POSSETTI, G. R. C.; LOBATO, L. C. S.; ANDREOLI, C. V.; CARNEIRO, C.; BICO, A. K.; WAGNER, L. G.; AISSE, M. M. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo – Nota Técnica 5 - Secagem e higienização térmica de lodo em diferentes portes de ETEs. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 59-74, 2022.

SANTOS, H. F. Normatização para o uso agrícola dos bio sólido no exterior e no Brasil, Capítulo 10. In: Andreoli, C. V.; von Sperling, M.; Fernandes, F. (Org.). *Lodo de esgoto: tratamento e disposição final*. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 484 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuais, v. 6)

SERRAT, B. M.; SANTIAGO, T. R.; BITTENCOURT, S.; MOTTA, A. C. V.; SILVA, L. A. T. P. da.; ANDREOLI, C. V. Taxa de aplicação máxima anual de lodo de esgoto higienizado pelo processo de estabilização alcalina: estudo comparativo de curvas de pH de solos. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 19, p. 30-37, 2011.

SHAFII, M. A.; LING, E. C. M.; SHAFFIE, E. The use of sewage sludge and its ash in construction and agriculture industry: A review. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, v. 81, n. 5, p. 81-90, 2019.

SPINOSA, L.; AYOL, A.; BAUDEZ, J. C.; CANZIANI, R.; JENICEK, P.; LEONARD, A.; RULKENS, W.; XU, G.; van DIJK, L. Sustainable and

innovative solutions for sewage sludge management. *Water*, v. 3, p. 702-717, 2011.

TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F.; STENSEL, H. D. Treatment, Reuse, and Disposal of Solids and Biosolids. In: Metcalf & Eddy. *Wastewater engineering: treatment and reuse*. 4th ed. McGraw-Hill series in Civil and Environmental Engineering. McGraw-Hill Higher Education, 2003. p. 1451-1628.

von SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4^a ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. 472 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuais, v. 1)

WONG, J.W.C.; FANG, M. Effects of lime addition on sewage sludge composting process. *Water Research*, v. 34, n. 15, p. 3691-3698, 2000.

WU, Q.; LIU, Z.; LIANG, J.; KUO, D. T. F.; CHEN, S.; HU, X.; DENG, M.; ZHANG, H.; LU, Y. Assessing pollution and risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in sewage sludge from wastewater treatment plants in China's top coal-producing region. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 191, n. 102, p. 1-15, 2019.

YANG, X.; MU, H.; ZHAO, H.; XUE, Z.; LI, N. Environmental impact, and economic benefit evaluation of sewage sludge treatment technologies. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, v. 446, 032078, 2020.

Parte A: Higienização e uso de lodo de esgoto no solo

Nota Técnica 2 – Aspectos legais

Part A: Sanitization and use of sewage sludge in soil
Technical Note 2 - Legislation aspects

**Simone Bittencourt^{1*}, Antonio Teixeira de Matos^{2(t)}, Bruno Sidnei da Silva³,
Marcelo Kenji Miki⁴, Rafael Kopschitz Xavier Bastos⁵**

RESUMO

O uso de lodo de esgoto em solo é uma prática ambientalmente sustentável que vai ao encontro dos objetivos da Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Rico em matéria orgânica e nutrientes, o lodo pode trazer benefícios às propriedades físico-químicas e biológicas do solo e para o desenvolvimento dos vegetais. Mas, como ele pode conter contaminantes químicos e microbiológicos, o seu uso deve aliar-se à proteção do ambiente e da saúde humana, seguindo critérios e procedimentos. Em 2020, foi aprovada a Resolução CONAMA nº 498 que define os critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solo. Além do agrícola, abrange outros usos, a exemplo da recuperação de áreas degradadas. O processamento do lodo, resultando no biossólido, deve ser realizado a partir de uma Unidade Gerenciadora de Lodo, devidamente licenciada no órgão ambiental competente. O biossólido é classificado, quanto à qualidade microbiológica, em Classes A e B e, quanto às substâncias químicas, em Classes 1 e 2, a depender dos critérios previstos na Resolução.

Palavras-chave: resíduo de saneamento; uso sustentável; lodo de esgoto.

ABSTRACT

The use of sewage sludge in soil is an environmentally sustainable practice, compatible with the Brazilian Policy of Solid Wastes. Due to its content of organic compounds and nutrients, the sludge is beneficial to the physical, chemical and biological soil properties and to the development of plants. However, since it may contain chemical and microbiological pollutants, it has to be carefully used by following criteria and procedures concerning the protection of the environment and public health. In 2020, Brazil approved Resolution 498 of CONAMA for the definition of criteria and procedures for production and application of biosolids in soil. Besides its agricultural use, this Resolution covers other uses, such as the recuperation of degraded areas. For the use of sludge on land, it needs to be processed in a Sludge Management Unit licensed by a local environmental agency. Depending on the criteria in the Resolution, biosolids are classified under Classes A and B for their microbiological quality, and under Classes 1 and 2 for their chemical aspects.

Keywords: sanitation waste, sustainable use, sewage sludge.

¹Engenheira Agrônoma, Mestre em Agronomia e Doutora em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Profissional da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). Professora do Curso de Gestão Ambiental da Faculdade Fael.

²Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Doutor em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade Federal de Viçosa. Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

³Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre em Ciências pela Universidade de São Paulo (USP). Engenheiro do Departamento de Execução de Projetos de Pesquisa, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da SABESP.

⁴Engenheiro Civil, Mestre em Hidráulica e Saneamento pela USP. Gerente do Departamento de Execução de Projetos de Pesquisa, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da SABESP.

⁵Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Especialização em Engenharia de Saúde Pública pela Escola Nacional de Saúde Pública (Fiocruz). PhD em Public Health Engineering, University of Leeds, UK. Professor Titular do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa.

^(t)in memoriam

*Endereço para correspondência: Rua Engenheiro Antônio Batista Ribas, 151 - casa 1. Tarumã, Curitiba, PR. CEP 82.800-130. E-mail: sbittencourt@sanepar.com.br

1. INTRODUÇÃO

Os impactos significativos gerados por atividades humanas e a crescente preocupação com a sustentabilidade econômica, ambiental e social têm estimulado políticas públicas voltadas à redução e reciclagem de resíduos e efluentes, à preservação e proteção de mananciais, ao manejo sustentável do solo e da água, entre outras.

Neste contexto, o lodo gerado em um dos processos indispensáveis para a despoluição ambiental, que é o tratamento de esgoto, deve ter um destino adequado e seguro, desde os pontos de vista de risco à saúde e de preservação ambiental.

O lodo é um dos subprodutos sólidos do tratamento de esgoto e suas características estão associadas à composição do esgoto, ao sistema de tratamento do esgoto e aos processos de gerenciamento do lodo. A qualidade e quantidade de lodo gerado é dependente do tipo e eficiência do tratamento a que o esgoto foi submetido. Esse subproduto é composto por parte da massa orgânica presente no esgoto afluente a estação de tratamento de esgoto (ETE), e, principalmente, pela biomassa (microrganismos que utilizaram o esgoto como alimento para crescer e se reproduzir). Assim, o lodo contém nutrientes, como nitrogênio e fósforo, essenciais para a nutrição de plantas, além de ser rico em matéria orgânica, o que traz melhorias às características físicas, químicas e biológicas do solo, tornando-o um excelente adubo e condicionador desse meio. O uso do lodo de esgoto proporciona resultados positivos também na recuperação de solos erodidos e de áreas degradadas (BEZERRA *et al.*, 2006; TAMANINI *et al.*, 2008; CUBA TERAN *et al.*, 2019), e como fonte de nutrientes para cultivos agrícolas e florestais (DESCHAMPS e FAVARETTO, 1998; JUNIO *et al.*, 2013; BACKES *et al.*, 2013).

No entanto, o lodo também pode conter poluentes - substâncias químicas e microrganismos - com potencial de causar impactos negativos ao ambiente e à saúde humana e de outros animais, demandando, assim, medidas que visam a redução e controle desses poluentes de forma que não apresentem riscos à saúde humana. Dessa forma, são estabelecidos critérios e normas que possibilitem obter o equilíbrio entre o uso benéfico no solo, a qualidade dos alimentos e a proteção do ambiente e da saúde humana.

Nesse contexto, a presente nota técnica (NT) tem como objetivo apresentar os principais aspectos legais referentes ao uso de lodo em solo, a fim de contribuir com o incremento dessa prática no País: (i) classificação do lodo de esgoto e a Política Nacional de Resíduos Sólidos; e (ii) os critérios e parâmetros estabelecidos nos atos normativos referentes a essa temática.

2. CLASSIFICAÇÃO DO LODO DE ESGOTO E A POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Segundo os critérios da Norma Brasileira - NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004), o lodo gerado em ETes (isto é, sem presença significativa de efluente industrial) é classificado como Resíduo Classe II A - não inerte. De acordo com essa norma, os Resíduos Classe II A podem ter propriedades, tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. A NBR 10.004/2004 não classifica os resíduos gerados nas ETes quanto à patogenicidade, que vem a ser um dos critérios utilizado para classificação de Resíduos Classe I - perigosos. Já na Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os resíduos sólidos gerados em sistemas de tratamento de esgoto, como o lodo, de acordo com a origem, são classificados como resíduos dos serviços públicos de saneamento básico. Por suas características, de material essencialmente orgânico e rico em nutrientes e, portanto, fonte de nutrientes para vegetais, recuperador e/ou condicionador de solos, o lodo bem se enquadra nos princípios de reciclagem e reutilização de resíduos e de desenvolvimento sustentável da PNRS (BRASIL, 2010).

A PNRS estabelece, também, que os geradores de resíduos sólidos dos serviços públicos de saneamento básico devem apresentar um Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) no processo de licenciamento ambiental da atividade, com o devido destaque à questão de segurança na condução dos processos, de modo que sejam evitados danos ao meio ambiente ou à saúde pública.

Portanto, o uso do lodo de esgoto em solos pode ser uma forma ambientalmente sustentável de destinação final, estando em consonância com a PNRS, que estabelece que, na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser considerada a seguinte ordem de prioridade: não geração,

redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e a disposição de rejeitos em aterro (BRASIL, 2010).

Como forma de promover a utilização segura do lodo de esgoto em solos brasileiros, são estabelecidos critérios e procedimentos em atos normativos do Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e na Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 498, de 19 de agosto de 2020, os quais serão abordados nos próximos itens desta NT (BRASIL, 2020a).

3. PRODUTOS CONTENDO LODO DE ESGOTO REGISTRADOS NO MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO

Frente às características benéficas do lodo de esgoto, o MAPA admite seu uso como produto agrícola, na condição de fertilizante orgânico, condicionador de solo ou substrato para plantas, ou ainda como matéria prima na produção desses insumos e sua utilização segura na agricultura. São várias as normativas que estabelecem critérios e procedimentos para o registro de estabelecimentos e produtos à base de lodo de esgoto, com diversas funções para o solo e para as plantas. A presente NT se limitará a abordar alguns aspectos dessas normativas, relacionados a produtos contendo lodo de esgoto, registrados para uso em solo, especificamente no que se refere a limites de contaminantes e restrições de uso.

Em relação à classificação de produtos contendo lodo de esgoto sanitário, a Instrução Normativa IN 25/2009 categorizava como Classe “D” os produtos que poderiam ser registrados como fertilizantes orgânicos mistos e compostos (BRASIL, 2019). A IN 25/2009 foi revogada pela IN 61/2020, a qual trata de regras para fertilizantes orgânicos e biofertilizantes destinados à agricultura e passa a classificar os produtos contendo lodo de esgoto como Classe “B” (BRASIL, 2020b):

“produto que utiliza, em sua produção, quaisquer quantidades de matérias-primas orgânicas geradas nas atividades urbanas, industriais e agroindustriais, incluindo a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos da coleta convencional, lodos gerados em estações de tratamento de esgotos, lodos industriais e agroindustriais gerados em sistemas de tratamento de águas

residuárias contendo qualquer quantidade de despejos ou contaminantes sanitários, todos com seu uso autorizado pelo Órgão Ambiental, resultando em produto de utilização segura na agricultura”.

A IN 61/2020 não impõe restrições de uso para produtos Classe “B”, no entanto, estabelece que esses produtos devem obrigatoriamente exibir “rótulos com informações sobre armazenamento, as recomendações e as limitações e restrições de uso e transporte, se houver”. Também determina que “quando o produto apresentar risco proeminente à saúde humana, animal e ao meio ambiente, o estabelecimento fica obrigado a informar na embalagem, rótulo, Nota Fiscal ou DANFE ou em folheto complementar, os cuidados, as restrições e as precauções de uso, as contraindicações, as incompatibilidades e os riscos que apresentam à saúde humana, animal e ao meio ambiente” (BRASIL, 2020b).

Apesar da mudança de classificação estabelecida na IN 61/2020, as IN 35/2006 e IN 05/2016 não foram alteradas e denominam como Classe “D” os produtos contendo lodo de esgoto registrados, respectivamente, como condicionador de solo, os quais possuem restrições de uso (BRASIL, 2006) e como substratos para plantas (BRASIL, 2016a). Esses produtos somente poderão ser comercializados para consumidores finais mediante recomendação técnica firmada por profissional habilitado, a qual pode ser impressa na embalagem, rótulo, folheto ou outro documento. Os estabelecimentos produtores deverão manter o controle da destinação à disposição da fiscalização, por um prazo mínimo de 180 dias para os produtores de condicionadores de solo e de cinco anos para produtores de substratos para plantas (BRASIL, 2006; 2016a).

O uso de condicionadores de solo Classe “D” é proibido no cultivo de culturas inundadas, pastagens, capineiras, olerícolas, tubérculos e raízes, bem como, as demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo e sua aplicação deve ser realizada por meio de equipamentos mecanizados e que o manuseio das culturas deve ser feito com o uso de equipamentos de proteção individual (EPI) (BRASIL, 2006).

Em relação à presença de contaminantes e microrganismos, a IN 27/2006, alterada pela IN 07/2016 (Brasil, 2006; 2016b) estabelece, para todas as classes, os limites apresentados na **Tabela 1**.

Tabela 1 – Limites máximos admitidos para contaminantes em substrato para plantas, fertilizantes orgânicos e condicionador de solo, registrados pelo MAPA.

Contaminante	Unidade	Substrato para plantas	Fertilizantes orgânicos e condicionador de solo
Arsênio	mg·kg ⁻¹ ST	20	20
Cádmio		8	3
Chumbo		300	150
Cromo hexavalente		-	2
Cromo		500	-
Mercurio		2,5	1
Níquel		175	70
Selênio		80	80
Coliformes termotolerantes	NMPg ⁻¹ ST	1.000	1.000
Ovos viáveis de helmintos	nº em 4g ST	1,0	1,0
<i>Salmonella sp</i>	nº em 10g ST	Ausência	Ausência
Materiais inertes, vidros, plásticos, metais > 2mm	% na matéria seca	-	0,5
Pedras > 5mm		-	5,0
Sementes ou qualquer material de propagação de ervas daninhas	planta por litro, em teste de germinação	0,5	-
As espécies fitopatogênicas dos Fungos do gênero <i>Fusarium</i> , <i>Phytophthora</i> , <i>Pythium</i> , <i>Rhizoctonia</i> e <i>Sclerotinia</i>		Ausência	-

Nota: ST – sólidos totais; NMPg⁻¹ ST – número mais provável por grama de sólidos totais (ST).

Fonte: Brasil (2016b).

É importante ressaltar que as classificações do MAPA para produto contendo lodo de esgoto, como Classe B, conforme a nova IN 61/2020, ou como Classe D, conforme as demais instruções normativas anteriormente mencionadas, não tem relação com o padrão microbiológico do produto. As classes de produtos estabelecidas nas instruções normativas do MAPA são definidas em função da origem da matéria-prima, e não devem ser confundidas com as classificações da Resolução CONAMA nº 498/2020, que será apresentada no próximo tópico.

4. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 498/2020

A Resolução CONAMA nº 498/2020 define critérios e procedimentos para produção e aplicação de bio-sólido em solos, revogando e substituindo a Resolução CONAMA nº 375/2006. A antiga Resolução nº 375/2006 trazia muitas inconsistências e dificuldades para a disseminação do uso agrícola de lodo de esgoto no Brasil. Diante disso, em um processo coordenado pela Câmara Temática de Tratamento de Esgotos da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES) e

Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) ETEs Sustentáveis, foi construída uma nova proposta de regulamentação, contando com a participação de diversos atores ligados ao setor de saneamento ambiental, incluindo representantes de empresas operadoras públicas e privadas, da academia e de órgãos reguladores. Apresentada a proposta ao CONAMA, a discussão naquele conselho culminou com a aprovação da Resolução CONAMA nº 498/2020. É importante notar que a Resolução CONAMA nº 498/2020 não se caracteriza simplesmente como uma revisão da Resolução CONAMA nº 375/2006. A nova resolução é calcada em critérios e procedimentos que vêm contribuir para o incremento da prática de destinação do lodo de esgoto no Brasil, de forma sustentável e, ao mesmo tempo, segura desde os pontos de vista de proteção ambiental e à saúde. Neste contexto, a presente NT realizará uma análise de aspectos da Resolução CONAMA nº 498/2020, evitando análises comparativas com a Resolução CONAMA nº 375/2006.

A Resolução CONAMA nº 498/2020 conceitua e diferencia os termos: lodo de esgoto e bio-sólido.

Lodo de esgoto: subproduto gerado no tratamento de esgoto, por processos de decantação primária, biológico ou químico, excluindo os resíduos removidos de desarenadores, de gradeamento e peneiramento; ou seja, é o lodo sem tratamento.

Biossólido: produto do tratamento do lodo de esgoto apto a ser aplicado em solos e que atende aos critérios microbiológicos e químicos estabelecidos na própria Resolução.

O uso em solo, consiste na aplicação controlada de biossólido, de modo a aproveitar sua capacidade como condicionador de solo e fornecedor de nutrientes para o desenvolvimento vegetal, incluindo o uso na recuperação de áreas degradadas. Entende-se como recuperação de área degradada, a recuperação da integridade física, química e/ou biológica e da capacidade produtiva de uma área, seja para produção de alimentos e matérias-primas ou na prestação de serviços ambientais (BRASIL, 2020a)

Uma questão bastante importante é que a Resolução CONAMA nº 498/2020 não se aplica a produtos à base de lodo de esgoto registrados no MAPA, deixando bem claro que nesse caso, os estabelecimentos produtores devem seguir os critérios e procedimentos estabelecidos nas normativas do MAPA.

4.1. Unidade de Gerenciamento de Lodo

O biossólido somente poderá ser produzido e utilizado em solo mediante a existência de uma Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL), devidamente licenciada pelo órgão ambiental competente. A UGL é a unidade que realiza o gerenciamento para transformar o lodo gerado por uma ou mais ETEs em biossólido. Cabe ressaltar, que apesar da definição não especificar, entende-se que a UGL também pode tratar lodos provenientes, exclusivamente, de sistema de tratamento individual, coletados por veículos, conforme citado no inciso II do artigo 3º da Resolução.

No processo de licenciamento, deverá ser apresentado o Plano de Gerenciamento da UGL, elaborado por profissional legalmente habilitado. Esse é o documento técnico que descreve todos os procedimentos, controles e métodos

a serem adotados para transformação do lodo em biossólido, visando sua aplicação segura no solo. Também deve conter o método e a forma de prestação de informação à população da localidade receptora sobre aspectos relacionados aos benefícios, riscos e cuidados no uso do biossólido.

Outro documento que deve ser apresentado ao órgão ambiental competente, anualmente ou quando solicitado, é o da rastreabilidade, de modo a relacionar a origem, a quantidade e a qualidade do biossólido com as respectivas áreas de aplicação. O anexo da Resolução apresenta o conteúdo mínimo a constar nesse documento.

Para fins de fiscalização, deverão ser mantidos em arquivo todos os documentos comprobatórios do processo, citados na Resolução, como projetos, relatórios e resultados de análises e monitoramento, conforme legislação em vigor, não sendo determinado prazo para a manutenção desses documentos. Para evitar dúvidas, esse prazo pode ser explicitado no Plano de Gerenciamento.

4.2. Qualidade do biossólido

A qualidade do biossólido deve ser comprovada quanto ao potencial agrônomo, à qualidade microbiológica, à redução de atratividade de vetores e à presença de substâncias químicas.

As análises qualitativas necessárias podem ser realizadas em laboratório próprio, conveniado ou subcontratado, com sistema de gestão de qualidade e normas de qualidade laboratorial. Planos e métodos de amostragens e de análises deverão ser descritos no Plano de Gerenciamento de UGL.

Poderá ser solicitada ao órgão ambiental competente, mediante fundamentação técnica, a dispensa, alteração de frequência ou alteração da lista de substâncias a serem analisadas no biossólido.

Em relação ao potencial agrônomo, quem definirá os parâmetros necessários a serem analisados no biossólido é o profissional responsável pela recomendação agrônoma, florestal ou de recuperação de área degradada. No entanto, quando o biossólido for utilizado para fins agrícolas, é obrigatória a análise das formas nitrogenadas - nitrogênio total ou Kjeldahl, amoniacal, nitrito e nitrato; e quando for destinado para recuperação de área degradada é necessária a análise de matéria orgânica no biossólido. No caso de o lodo de esgoto ter sido tratado

por estabilização alcalina (NT 3 – ANDREOLI *et al.*, 2022), deverá ser determinado o poder de neutralização (PN) ou poder relativo de neutralização total (PRNT) do produto, para que seja possível a realização dos cálculos de dose de aplicação de biossólido no solo.

A Resolução CONAMA nº 498/2020 classifica o biossólido em Classe A ou Classe B, quanto à qualidade microbológica, e em Classe 1 ou Classe 2, de acordo com os valores máximos permitidos de substâncias químicas.

4.2.1. Qualidade microbológica

A seguir são descritos os critérios para classificação do biossólido em Classe A ou Classe B.

Biossólido Classe A

Para ser classificado como Classe A, o biossólido deve apresentar, no máximo, 10^3 *Escherichia coli*·g⁻¹ de sólidos totais (ST) e ser proveniente de um dos processos de redução de patógenos, descritos na Resolução, e a seguir de forma resumida, com a comprovação de que os parâmetros operacionais de redução de patógenos desses processos foram atendidos:

- **Alternativa 1:** Lodo tratado por um dos quatro regimes de tempo e temperatura apresentados na Resolução. O período de tempo associado a um determinado valor de temperatura deve ser calculado por meio de equações apresentadas na Resolução, respeitando os requisitos mínimos de tempo e temperatura para cada regime.
- **Alternativa 2:** Lodo tratado por processos que proporcionem valores elevados de pH e temperatura. Esses processos relacionam a elevação do pH e de temperatura por um período de tempo e estabelecem um teor final de ST para o biossólido.
- **Alternativa 3:** Também se refere a processos que relacionam tempo e temperatura ou tempo e pH, mas que não sejam os apresentados nas alternativas 1 e 2. Esses processos dependem de validação, ou seja, de comprovação por meio de resultado de pesquisas, sendo necessária a comprovação das condições que garantam a produção de biossólido com menos de 1 ovo viável de helminto·g⁻¹ de ST. Mediante essa comprovação, os parâmetros de controle operacional do processo podem ser utilizados como indicadores da produção de biossólido Classe A,

não sendo, assim, mais necessária a pesquisa de ovos de helmintos no biossólido. Mas, para efeito de validação, é necessária a aprovação pelo órgão ambiental competente de um plano de amostragem detalhado.

- **Alternativa 4:** Lodo tratado em processos não especificados. Essa alternativa só é aplicável em biossólido produzido em lotes, não sendo necessário especificar um processo de redução de patógenos, mas é necessário que cada lote seja caracterizado quanto a ovos viáveis de helmintos e que o resultado seja menor que 1 ovo viável de helminto·g⁻¹ de ST.
- **Alternativa 5:** Lodo tratado em um dos processos de redução adicional de patógenos listados na Resolução para essa alternativa, atendendo os respectivos critérios operacionais apresentados para cada processo. Os processos listados são: compostagem confinada ou em leiras aeradas, secagem térmica direta ou indireta, tratamento térmico pelo aquecimento do lodo líquido, digestão aeróbia termofílica a ar ou oxigênio, irradiação com raios beta ou com raios gama e pasteurização.
- **Alternativa 6:** O lodo de esgoto sanitário é tratado por um outro processo comprovadamente equivalente a um processo de redução adicional de patógenos e aceito pelo órgão ambiental competente.

Biossólido Classe B

O biossólido Classe B deve apresentar no máximo 10^6 *Escherichia coli*·g⁻¹ de ST ou ser proveniente de um dos processos de redução de patógenos, descritos na Resolução e descritos a seguir de forma resumida, com a comprovação de que os parâmetros operacionais de redução de patógenos desses processos foram atendidos:

- **Alternativa 1:** Lodo tratado em um processo de redução significativa de patógenos, listados na Resolução, atendendo os respectivos critérios operacionais, apresentados para cada processo. Os processos listados são: digestão aeróbia (ar ou oxigênio), secagem em leitos de areia ou em bacias (solarização), pavimentadas ou não, cobertas ou não, até atingir teor de sólidos mínimo de 60%, digestão anaeróbia, compostagem por qualquer um dos métodos e estabilização com cal.
- **Alternativa 2:** O lodo de esgoto sanitário é tratado por um outro processo comprovadamente equivalente a

um processo de redução significativa de patógenos e aceito pelo órgão ambiental competente.

4.2.2. Redução de atratividade de vetores

A Resolução apresenta duas opções para o atendimento do critério de redução de atratividade de vetores, sendo que em ambas é necessária a comprovação do atendimento dos respectivos parâmetros operacionais ou de variáveis de controle de qualidade:

- **Opção 1:** Deve ser comprovada que a fração orgânica do biossólido está estabilizada, apresentando relação entre sólidos voláteis e sólidos totais (SV/ST) inferior a 0,65, quando o lodo for proveniente de um dos seguintes processos de tratamento do esgoto sanitário: reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB, do inglês *upflow anaerobic sludge blanket*) e filtro anaeróbio; lagoas de estabilização; lodos ativados com idade do lodo igual ou superior a 18 dias, ou relação alimento e microrganismo (A/M) igual ou inferior a 0,15 kgDBO₅·kg⁻¹SV; digestão aeróbia e anaeróbia e estabilização química do lodo, de acordo com as normas técnicas vigentes; e sistemas alagados construídos.
- **Opção 2:** O lodo de esgoto deve ser proveniente de um dos processos listados na Resolução (digestão anaeróbia, digestão aeróbia, compostagem, estabilização química, secagem, aplicação subsuperficial e incorporação no solo), atendendo os respectivos critérios operacionais, apresentados para cada processo.

4.2.3. Substâncias químicas

O biossólido será classificado em Classe 1 ou Classe 2, de acordo com os valores máximos permitidos de substâncias químicas apresentados na **Tabela 2**, sendo que os valores não poderão ser ultrapassados em nenhuma das amostras analisadas.

Para compreender os critérios de uso dessas duas Classes, a Resolução apresenta dois conceitos: (i) taxa máxima anual - quantidade máxima de substâncias químicas que pode ser aplicada por hectare no período de um ano; e (ii) carga máxima acumulada - quantidade máxima de substâncias químicas acumulada ao longo de todas as aplicações de biossólido na mesma área, acima da qual não são permitidas novas aplicações do biossólido.

Tabela 2 – Valores máximos permitidos de substâncias químicas em biossólido a ser destinado para uso em solos.

Substância química	Valor máximo permitido no biossólido (mg·kg ⁻¹ ST)	
	Classe 1	Classe 2
Arsênio	41	75
Bário	1300	1.300
Cádmio	39	85
Chumbo	300	840
Cobre	1.500	4.300
Cromo	1.000	3.000
Mercúrio	17	57
Molibdênio	50	75
Níquel	420	420
Selênio	36	100
Zinco	2.800	7.500

Os conceitos de taxa e carga máxima só são aplicáveis ao lodo Classe 2; para o lodo Classe 1 não é necessário realizar os cálculos de taxa e de carga máxima para determinar a dose de aplicação do biossólido. O lodo Classe 2 somente poderá ser aplicado em solos se a taxa anual e a carga acumulada de substâncias químicas não exceder os limites apresentados na **Tabela 3**.

Tabela 3 – Taxa máxima anual e carga máxima acumulada de substâncias químicas em solos quando do uso de biossólido Classe 2.

Substâncias químicas	Taxa máxima anual (kg·ha ⁻¹ ·ano ⁻¹)	Carga máxima acumulada (kg·ha ⁻¹)	
		Solos de áreas degradadas	Solos de áreas não degradadas
Arsênio	2	20	40
Bário	13	130	260
Cádmio	1,9	19	38
Cromo	150	1.500	3.000
Cobre	75	750	1.500
Chumbo	15	150	300
Mercúrio	0,85	8,5	17
Molibdênio	0,65	6,5	13
Níquel	21	210	420
Selênio	5	50	100
Zinco	140	1.400	2.800

Nota: O conceito de taxa anual se aplica apenas ao uso agrícola e não à recuperação de área degradada.

Em relação às substâncias orgânicas potencialmente tóxicas no biossólido, o órgão ambiental competente poderá solicitar, por prazo determinado, a verificação dessas substâncias, desde que apresente justificativa relacionada às características específicas da bacia de esgotamento sanitário e dos efluentes recebidos nas ETEs que destinam lodo de esgoto à UGL. Além de especificar as substâncias que devem ser verificadas, é importante que seja estabelecida uma periodicidade para essa verificação e o limite máximo permitido dessas substâncias no biossólido.

4.3. Usos do biossólido

A Resolução permite o uso de biossólido de qualquer classe e em quaisquer culturas para fins de pesquisa, bem como para o cultivo de cortinas verdes, jardins e gramados em áreas de ETEs ou UGLs, desde que cumpram os preceitos de segurança das legislações aplicáveis; porém, assim como para os demais usos, a permissão é condicionada ao lodo ser proveniente de uma UGL devidamente licenciada.

Também é permitida a aplicação de biossólido em áreas degradadas e em áreas protegidas, sendo que em Unidades de Conservação de Proteção Integral apenas poderá ser aplicado biossólido Classe A1. No entanto, não é permitida a aplicação de biossólido em Áreas de Preservação Permanente (APP).

4.3.1. Usos do biossólido Classe A

O biossólido Classe A é passível de ser utilizado em cultivos de produtos alimentícios e não alimentícios, pastagens e forrageiras, além de florestas plantadas, recuperação de solos e áreas degradadas.

Especificamente no caso de cultivo de alimentos consumidos crus e cuja parte comestível tenha contato com o solo, bem como para pastagens e forrageiras, é vedada a aplicação do biossólido no período de um mês antes da colheita ou do pastejo. Nos demais casos, não há restrição relacionada ao período pós-aplicação do biossólido Classe A.

4.3.2. Usos do biossólido Classe B

Não há restrição de uso de biossólido Classe B no cultivo de florestas plantadas, recuperação de solos e de áreas

degradadas. No cultivo de árvores frutíferas, a aplicação deve ser realizada após a colheita.

Não é permitido o uso de biossólido Classe B no cultivo de produtos alimentícios que possam ser consumidos crus. Em áreas que tenham recebido a aplicação de biossólido Classe B deverá ser observado prazo mínimo de 6 meses antes do cultivo, com biossólido Classe A ou sem uso de biossólido, de produtos alimentícios que possam ser consumidos crus.

A aplicação de biossólido Classe B deve ser realizada em período superior a quatro meses antes da colheita de cultivos de alimentos que não sejam consumidos crus, incluindo aqueles cuja parte comestível tenha contato com o solo, produtos não alimentícios e de forrageiras. Para o pastejo de animais é necessário aguardar no mínimo dois meses após a aplicação de biossólido Classe B.

4.4. Aplicação do biossólido em solos

O uso do biossólido em solos somente pode ocorrer mediante à elaboração de projeto específico para a área de aplicação, firmado por profissional devidamente habilitado e acompanhado de Anotação de Responsabilidade Técnica (ART).

O projeto deve conter todas as informações sobre o biossólido a ser utilizado, sobre a área de aplicação, incluindo a aptidão da área e as restrições locacionais, dados do cultivo, a dose e forma de aplicação e práticas de conservação do solo e da água. Também deve conter as restrições e os cuidados no uso e manuseio do biossólido, a identificação e assinatura do responsável técnico pelo projeto e do proprietário da área.

Cabe destacar que o Plano de Gerenciamento da UGL deve apresentar um levantamento semi-detalhado da região prioritária de aplicação do biossólido, mostrando o zoneamento da aptidão das terras (aspectos edafoclimáticos e ambientais), a definição das potencialidades e das limitações da região. No Plano também devem ser descritos procedimentos para carregamento, transporte e aplicação do biossólido.

Já o projeto é um documento detalhado, específico para cada área de aplicação, trazendo informações como localização da área, características do solo, entre outras,

sendo que o profissional responsável deverá informar aos envolvidos no carregamento, transporte e aplicação, os procedimentos de higiene e segurança e uso de equipamentos de proteção individual (EPI). Nesse projeto deve ser apresentada a dose de aplicação do bio sólido, que é determinada adotando-se o menor valor calculado de acordo com os critérios apresentados na **Tabela 4**.

Além desses critérios, o responsável técnico deve levar em conta as necessidades nutricionais dos cultivos, a quantidade de nutrientes fornecida e disponibilizada pelo bio sólido no solo. Dessa forma, é necessário caracterizar a área quanto aos parâmetros de fertilidade do solo antes da aplicação do bio sólido; em regiões de solos salinos, salino-sódicos e sódicos deve-se caracterizar também o sódio trocável e a condutividade elétrica do solo, de modo que não seja aplicado bio sólido em solos com níveis desses parâmetros acima dos limites estabelecidos pelo órgão ambiental. Também será necessário o monitoramento de substâncias químicas no solo da área de aplicação, sempre que estas forem consideradas limitantes da dose de aplicação do bio sólido no solo.

5. CARACTERIZAÇÃO DE LOTE VERSUS MONITORAMENTO DE BIOSSÓLIDO

Uma diferenciação importante de conceitos é a de monitoramento de bio sólido destinado de forma contínua e de caracterização de lote.

O lote de bio sólido é definido como a quantidade de lodo de esgoto beneficiado e tratado em uma UGL em intervalo de tempo determinado, cuja característica principal é a homogeneidade. O lote deve ser caracterizado após a fase de seu encerramento, por meio de um conjunto de análises

laboratoriais (substâncias químicas, parâmetros agrônômicos e qualidade microbiológica) definidas na Resolução e/ou no Plano de Gerenciamento da UGL. Esse processo é denominado “caracterização do lote”. A definição da quantidade de lodo de cada lote e a periodicidade da formação dos lotes deve ser definida no Plano de Gerenciamento da UGL. No caso de UGLs de pequeno porte, com pouca geração de lodo, é possível a formação de um lote a cada dois anos. A Resolução CONAMA nº 498/2020 especifica que a caracterização do lote em termos de substâncias químicas deverá ser realizada em prazo máximo de três meses antes da destinação, com o intuito de evitar a obsolescência dos resultados das análises. Já a caracterização da qualidade bacteriológica, em termos de *Escherichia coli* deve ser realizada 10 dias após a formação do lote, devido à possibilidade de recrescimento de bactérias, o que, entretanto, é um fenômeno temporário e de curta duração (FEITOZA, 2017).

Já o monitoramento, se aplica ao bio sólido destinado de forma contínua, sem a formação de lotes; inclui análises laboratoriais de parâmetros agrônômicos, substâncias químicas e qualidade microbiológica de uma amostra representativa de bio sólido a serem realizadas com frequência mínima estabelecida na Resolução em função da quantidade de bio sólido a ser destinado para uso em solos ($t \text{ ST-ano}^{-1}$), variando de anual a mensal.

Em ambos os casos (caracterização de lote e monitoramento) se deve realizar também o acompanhamento dos parâmetros de controle operacional do processo de redução de patógenos, definidos na Resolução CONAMA nº 498/2020 como os “*parâmetros principais de controle dos processos de gerenciamento do lodo na ETE e/ou na UGL, monitorados com maior frequência, que indicam se*

Tabela 4 – Critérios de limitação para o cálculo de dose de aplicação de bio sólido em solos de áreas degradadas e não degradadas.

Bio sólido	Solos de áreas não degradadas	Solos de áreas degradadas
Classe 1	- Não exceder a necessidade de nitrogênio (N) da cultura, a partir do cálculo de fornecimento de N disponível no bio sólido. - Não exceder a necessidade de correção de acidez do solo para bio sólido tratados por processo alcalino.	- Alcançar teor final de 3% de matéria orgânica no volume de solo da camada arável via aplicação do bio sólido. - Não exceder a necessidade de correção de acidez do solo para bio sólido tratados por processo alcalino.
Classe 2	- Não exceder a necessidade de N da cultura, a partir do cálculo de fornecimento de N disponível no bio sólido. - Não exceder a necessidade de correção de acidez do solo para bio sólido tratados por processo alcalino. - Não exceder a taxa máxima anual e a carga máxima acumulada de cada substância química.	- Alcançar teor final de 3% de matéria orgânica no volume de solo da camada arável via aplicação do bio sólido. - Não exceder a necessidade de correção de acidez do solo para bio sólido tratados por processo alcalino. - Não exceder a carga máxima acumulada de cada substância química

a qualidade esperada no beneficiamento foi alcançada e se está de acordo com uma caracterização completa realizada previamente e com menor frequência” (BRASIL, 2020a).

Segundo a Resolução CONAMA nº 498/2020, o órgão ambiental poderá autorizar a redução na frequência de monitoramento quando, após dois anos de monitoramento, for comprovada baixa variabilidade na concentração de substâncias químicas, da qualidade microbiológica, dos parâmetros de controle operacional dos processos de redução de patógenos e de atratividade de vetores do biossólido.

Na referida Resolução está estabelecido que, caso os valores para substâncias químicas alcancem 80% dos limites apresentados na **Tabela 2**, a UGL deverá implementar

medidas adequadas para redução desses valores, realizando amostragens em intervalos menores e comunicando ao órgão ambiental competente. Também se estabelece que monitoramentos adicionais do biossólido podem se fazer necessários quando da ocorrência de alterações nos parâmetros de controle operacional do processo de redução de patógenos e de alterações significativas das características do esgoto afluente às ETEs que destinam lodo de esgoto à UGL.

Para melhor entendimento desses conceitos, a seguir serão apresentados **Exemplos (1 e 2)** hipotéticos de UGLs, com produção de biossólido, Classe A e Classe B, destinados em lotes e de forma contínua.

Exemplo 1: UGL com produção de biossólido Classe A

Características de uma UGL hipotética com produção de biossólido Classe A:

- Geração de lodo de esgoto: 1.200 t-ST/ano¹
- Processo de redução de atratividade de vetores: Lodo proveniente de tratamento de esgoto em reator UASB e relação SV/ST < 0,65
- Processo de redução de patógenos: Secagem térmica com redução do teor de água no lodo de esgoto a 10% ou menos, devendo a temperatura das partículas de lodo superar 80 °C ou a temperatura de bulbo úmido de gás, em contato com o lodo de esgoto, no momento da descarga do secador, ser superior a 80 °C
- Parâmetros de controle operacional diário: T > 80 °C e ST_{final} > 90%

UGL com produção de biossólido em lotes:

No Plano de Gerenciamento da UGL, descreve-se que serão formados dois lotes por ano, com cerca de 600 t de ST cada, sendo que um lote será finalizado próximo ao período de demanda agrícola para cultivos de inverno (p. ex.: abril) e outro próximo a demanda agrícola para cultivos de verão (p. ex.: outubro). Nesse caso, os parâmetros temperatura e sólidos totais do biossólido ao final do processo de secagem térmica serão controlados diariamente por meio de registro automatizado dos dados operacionais do secador térmico. Após 10 dias da finalização, cada lote será caracterizado no que se refere ao teor de sólidos voláteis, substâncias químicas, *Escherichia coli* e parâmetros agronômicos especificados no Plano de Gerenciamento, incluindo nitrogênio total, amoniacal, nitrito e nitrato. Após a caracterização, o lote deverá ser destinado em prazo máximo de três meses.

UGL com destinação de biossólido de forma contínua:

No Plano de Gerenciamento da UGL descreve-se que serão destinadas, uma vez por semana, cerca de 30 t de ST para uma fazenda de cultivo de café. A frequência de monitoramento das substâncias químicas, *E. coli* e do teor de SV será realizada trimestralmente, conforme estabelecido pela Resolução para uma UGL com geração de 1.200 t-ST/ano¹. Os parâmetros de controle operacional do processo de secagem térmica - temperatura e sólidos totais do biossólido - serão controlados diariamente por meio de registro automatizado, devendo essa frequência estar descrita no Plano de Gerenciamento.

Exemplo 2: UGL com produção de biossólido Classe B

Características de uma UGL hipotética com produção de biossólido Classe B:

- Geração de lodo de esgoto: 1.200 t-ST/ano¹
- Processo de redução de atratividade de vetores: Lodo proveniente de tratamento de esgoto em reator UASB e relação SV/ST < 0,65
- Processo de redução de patógenos: Lodo proveniente de desaguamento em leito de secagem, apresentando teor final de sólidos totais acima de 60%.
- Parâmetros de controle operacional diário: ST_{final} > 60%

UGL com produção de biossólido em lotes:

No Plano de Gerenciamento da UGL, deve estar descrito que serão formados dois lotes por ano, com cerca de 600 t de ST cada, sendo que um lote será finalizado próximo ao período de demanda agrícola para cultivos de inverno (p. ex.: abril) e outro próximo a demanda agrícola para cultivos de verão (p. ex.: outubro). Após 10 dias da finalização, cada lote será caracterizado no que se refere ao teor de ST, para comprovação de ST > 60%, sólidos voláteis e substâncias químicas, *Escherichia coli* e parâmetros agronômicos especificados no Plano de Gerenciamento, incluindo teores de nitrogênio total, amoniacal, nitrito e nitrato. Após a caracterização, o lote deverá ser destinado em um prazo máximo de três meses.

UGL com produção de biossólido de forma contínua:

A frequência de monitoramento do teor das substâncias químicas e de SV, além de *E. coli* será realizada trimestralmente, conforme estabelecido na Resolução, para uma UGL com geração de 1.200 t-ST/ano¹. O parâmetro de controle operacional do processo de secagem - sólidos totais do biossólido - será controlado no momento da retirada do biossólido do leito de secagem sendo o método de amostragem e de registro do parâmetro descritos no Plano de Gerenciamento.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Resolução CONAMA nº 498/2020 estabelece um conjunto de critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, tendo em conta os princípios de reciclagem e reutilização de resíduos e de desenvolvimento sustentável. Essa Resolução foi construída com a participação de diferentes atores, ou seja, uniu o conhecimento operacional das companhias de saneamento com o conhecimento científico de pesquisadores das universidades brasileiras

Um diferencial fundamental dessa resolução é o seu embasamento em avaliação de risco microbiológico, ao contrário da resolução anterior. Outro diferencial importante e que possibilitará a ampliação do aproveitamento benéfico do lodo de esgoto no solo é a possibilidade de utilização de parâmetros de controle operacional como indicadores de qualidade microbiológica do biossólido produzido como Classe A ou Classe B. Para a utilização desses indicadores, a resolução apresenta uma série de processos de tratamento, onde os parâmetros de controle operacional são conhecidos e já cientificamente comprovados com relação a sua eficiência na redução de organismos patogênicos aos padrões estabelecidos na Resolução. Porém, outros processos de tratamento poderão ser propostos, porém seus indicadores de controle operacional deverão ser submetidos a um processo de avaliação de equivalência a biossólido Classe A ou Classe B pelo órgão ambiental competente.

A Resolução mantém sintonia com algumas das principais referências de regulamentação congêneres no cenário internacional, como, por exemplo, as normas / diretrizes vigentes nos EUA (USEPA, 1994), na União Europeia (CEC, 1986) e no Reino Unido (DEFRA, 2018), tanto em relação à qualidade química quanto microbiológica do biossólido.

No que tange à qualidade química, a referida sintonia se expressa na similaridade de exigências em termos de valor máximos permitidos de substâncias químicas biossólido, de taxa máxima anual de aplicação e de carga máxima acumulada no solo.

De forma análoga, a Resolução CONAMA nº 498/2020 mantém, assim como na regulamentação dos EUA e do Reino Unido, a abordagem de dupla barreira de proteção à saúde (tratamento do lodo e restrições de uso), estabelecendo

dois níveis de qualidade microbiológica de biossólido (Classes A e B), para os quais são estabelecidas diferentes restrições de aplicação. Para as duas classes de biossólido, as exigências de tratamento e de qualidade microbiológica expressas na Resolução CONAMA nº 498/2020 são praticamente as mesmas das citadas normas de referência internacional. As restrições de uso (restrições de culturas, de método de aplicação e tempo a ser observado entre a aplicação e o cultivo, colheita ou pastejo) estabelecidas na nova Resolução estão calcadas em estudos de avaliação de risco (BASTOS *et al*, 2009; MAGALHÃES, 2012) e, adicionalmente, no princípio da precaução. Esta, aliás, é a fundamentação para o não banimento, puro e simples, do uso de lodo Classe B, mas, cabendo, sim, medidas de controle de riscos para sua aplicação segura.

Espera-se que as normatizações brasileiras possibilitem o aproveitamento desse importante subproduto do tratamento de esgoto no solo, haja vista seus benefícios ambientais no que tange a recuperação da matriz orgânica de solos degradados, como condicionador de solos agrícolas e, também, como fertilizante, já que o lodo de esgoto é um subproduto rico em nutrientes. Reitera-se, assim, o entendimento já expresso nesta NT que a normatização tem por objetivo contribuir para o incremento da prática de uso do lodo de esgoto no Brasil, sem, no entanto, descuidar de aspectos de proteção ambiental e à saúde.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Câmara Temática de Tratamento de Esgotos da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, gestões 2016-2018, 2018-2020 e 2020-2022, e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis pela oportunidade de participar da construção da proposta da Resolução CONAMA nº 498/2020, bem como o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG.

Este trabalho faz parte da série de publicações do INCT ETEs Sustentáveis

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004. 71p.
- ANDREOLI, C. V.; BICO, A. K.; BITTENCOURT, S.; PEGORINI, E. S.; POSSETTI, G. R. C.; CERQUEIRA, P. L. W.; RIETOW, J. C.; AISSE, M. M. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo – Nota Técnica 4 - Higienização de lodo via estabilização alcalina. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 45-58, 2022.
- BACKES, C., SANTOS, A. J. M., GODOY, L. J. G. de, VILLAS BÔAS, R. L., OLIVEIRA, M. R. de; OLIVEIRA, F. C. de. Doses de lodo de esgoto compostado em produção de tapete de grama esmeralda imperial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 5, p. 1402-1414, 2013.
- BASTOS, R. K. X.; BEVILACQUA, P. D.; DIAS, G. M. F.; BARONY, F. J. A. Análise crítica da legislação brasileira para uso agrícola de lodos de esgotos na perspectiva da avaliação quantitativa de risco microbiológico. *Revista AIDIS*, v. 2, n. 1, p. 143-59, 2009.
- BEZERRA, F. B.; OLIVEIRA, M. A. C. L.; PEREZ, D. V.; ANDRADE, A. G.; MENEGUELL, N. A. Lodo de esgoto em revegetação de área degradada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 3, p. 469-476, 2006.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Brasília, DF, 2020a.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa nº 61, de 08 de julho de 2020. Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura. Brasília, DF, 2020b.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016. Estabelece as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília, DF, 2016a.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa nº 7, de 04 de abril de 2016. Altera a Instrução Normativa SDA nº 27, de 5 de junho de 2006 que estabelece os limites máximos de contaminantes e agentes fitotóxicos patogênicos ao homem, animais e plantas a serem atendidos nos fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes. Brasília, DF, 2016b.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa nº 25, de 23 de julho de 2009. Estabelece as normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura. Brasília, DF, 2009.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa nº 35, de 4 de julho de 2006. Aprova as normas sobre especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade e de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura. Brasília, DF, 2006.
- BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei Federal nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, 2010.
- CEC. Council of the European Communities. *Council Directive 86/278/EEC of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture*. 1986. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:01986L0278-20180704>. Acesso em: 05 de outubro de 2020.
- CUBA TERAN, F. J.; SANTOS, G. DE O., TEIXEIRA JÚNIOR, W.; FREITAS, E. C. B. de, SOARES, J. A. Avaliação da recuperação de áreas degradadas por exploração de cascalho laterítico por meio da incorporação de lodo de esgoto. Estudo de caso no Distrito Federal. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 1, p. 3243-3255, 2019.
- DEFRA. Department for Environment, Food & Rural Affairs guidance. *Sewage sludge in agriculture: code of practice for England, Wales and Northern Ireland*. 2018. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/publications/sewage-sludge-in-agriculture-code-of-practice/sewage-sludge-in-agriculture-code-of-practice-for-england-wales-and-northern-ireland>. Acesso em: 05 de outubro de 2020.

DESCHAMPS, C.; FAVARETTO, N. Efeito do lodo de esgotos complementado com fertilizante mineral na produtividade e desenvolvimento da cultura do feijoeiro e do girassol. *SANARE*, v. 8, n. 8, p. 33-39, 1998.

FEITOZA, T.G. *Patógenos humanos em solo cultivado com eucalipto e tratado com lodo de esgoto classe B: risco, sobrevivência e recrescimento*. 2017. 184 f. Dissertação (Mestrado em Biologia na Agricultura e no Ambiente). Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

JUNIO, G. R. Z.; SAMPAIO, R. A.; NASCIMENTO, A. L.; SANTOS, G. B.; SANTOS, L. D. T.; FERNANDES, L. A. Produtividade de milho adubado com composto de lodo de esgoto e fosfato natural de Gafsa. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 7, p. 706-712, 2013.

MAGALHÃES, T. B. *Uso agrícola de biossólidos: análise crítica da Resolução CONAMA 375/2006 na perspectiva da metodologia de avaliação quantitativa de risco microbiológico*. 2012. 202 f. *Dissertação* (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

TAMANINI, C. R.; MOTTA, A. C. V.; ANDREOLI, C. V.; DOETZER, B. H. Land reclamation recovery with the sewage sludge use. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 51, n. 4, p. 643-655, 2008.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. *A Plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule*. Washington, 1994. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-12/documents/plain-english-guide-part503-biosolids-rule.pdf>. Acesso em: 05 de outubro de 2020.

Parte A: Higienização e uso de lodo de esgoto no solo

Nota Técnica 3 – Higienização de lodo via compostagem

Part A: Sanitization and use of sewage sludge in soil
Technical Note 3 - Sludge sanitization by composting

**Antonio Teixeira de Matos^{1(t)}, Renata Leandro Rodrigues Bortolini²,
Bárbara Albuquerque Branco de Moraes³, Wanderli Rogério Moreira Leite^{4*},
Mário Takayuki Kato⁵**

RESUMO

A destinação final do lodo é um grande problema no gerenciamento do tratamento de esgoto, por ser um subproduto com geração contínua, exigindo descarte sistemático. As formas de disposição final do lodo contemplam os aterros sanitários, aproveitamento energético e uso agrícola como fertilizante. Para aplicação em solo, o lodo deve ser submetido a um processo prévio de higienização. Dentre as técnicas de higienização está a compostagem do lodo, para transformá-lo em material orgânico de apreciável valor fertilizante para as plantas e enriquecimento do solo, e com baixo risco sanitário para o ambiente. Esta nota técnica (NT) foi construída a partir do ordenamento dos conhecimentos consolidados de pesquisadores e especialistas, bem como da literatura especializada. Procurou-se fundamentar conceitos, critérios de dimensionamento e técnicas operacionais relativas ao processo de transformação do lodo, via compostagem, para geração de um produto de qualidade como fertilizante e benéfico em termos ambientais.

Palavras-chave: leira; adubo orgânico; biossólido; aproveitamento agrícola.

ABSTRACT

The final disposal of sludge is one of the major drawbacks in the management of sewage treatment because of its production and accumulation, demanding systematic discharge. Landfilling, sludge-to-energy recovery methods and agricultural use are some alternatives of final destinations. For agricultural purposes, the sludge should undergo an sanitization. Composting can be used for sanitization and the resulting *compost* contains stabilized organic matter and nutrients that are useful for plants and soil conditioning. This Technical Note (TN) was prepared by consolidating knowledge of researchers and practical specialists, as well as information from specialized literature. Basic concepts, design criteria and operational techniques were sought with the aim of enabling sewage sludge transformation via composting, not only to produce a quality product, such as fertilizer, but also to benefit the environment.

Keywords: compost pile; organic fertilizer; biosolid; agricultural use.

¹Engenheiro Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), Doutor em Solos e Nutrição de Plantas pela UFV. Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

²Engenheira Ambiental pela UFMG, Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG.

³Engenheira Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Mestre em Tecnologia Ambiental pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

⁴Engenheiro Ambiental pela Universidade do Estado do Pará (UEPA), Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UFPE. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

⁵Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), Doutor em Tecnologia Ambiental e Ciências da Agricultura pela Universidade Agrícola de Wageningen, Holanda. Professor Titular do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UFPE. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

(t) in memoriam

***Endereço para correspondência:** Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Laboratório de Saneamento Ambiental, Avenida Acadêmico Hélio Ramos, s/n. Cidade Universitária. Recife, PE. CEP: 50740-530. E-mail: wanderli.leite@ufpe.br

1. INTRODUÇÃO

O lodo gerado em processos de tratamento de esgoto sanitário é um subproduto semissólido, pastoso ou sólido e de natureza predominantemente orgânica, contendo substâncias químicas (dentre elas nutrientes e metais pesados) e microrganismos patogênicos que podem afetar a saúde pública e o meio ambiente. Devido à possibilidade de geração de odores, à presença de patógenos e ao elevado volume produzido, o gerenciamento de lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE) é desafiador (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008). Em grande parte das ETes, o lodo gerado é destinado a aterros sanitários que, embora seja uma rota de destinação aceitável, não é a mais adequada ao meio ambiente.

Por ser possuidor de grande quantidade de macro e micronutrientes para as plantas e importante fonte de matéria orgânica para os solos, o lodo de esgoto se enquadra nos princípios de reutilização / reaproveitamento de resíduos em consonância com a Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). Assim, sob a ótica do fechamento de ciclos, entende-se que o uso benéfico do lodo de esgoto em solos é uma alternativa de disposição ambientalmente adequada, a qual deve ser estimulada nas ETes sustentáveis, visto que acarreta economia de área em aterro sanitário, aumentando a sua vida útil; além de promover o reaproveitamento agrícola da matéria orgânica e a reciclagem de nutrientes para o solo.

A estabilização é a etapa do gerenciamento de lodos na qual ocorre atenuação do potencial de putrefação deste subproduto, reduzindo o seu conteúdo orgânico e a possibilidade de geração de maus odores (ANDREOLI *et al.*, 2001). Os métodos utilizados na estabilização de lodos envolvem processos físicos, químicos e biológicos. Algumas técnicas de estabilização ainda apresentam a vantagem de reduzir ou eliminar os microrganismos patogênicos presentes no lodo, promovendo a sua higienização. A compostagem e a estabilização alcalina encontram-se entre os processos amplamente aplicados para a estabilização e higienização de lodos de esgoto, possibilitando que o biossólido produzido possa ser aplicado em solos agrícolas, aproveitando a matéria orgânica e os nutrientes ali presentes. No Brasil, o uso do lodo de esgoto em solos encontra amparo legal na Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 498, de 19 de

agosto de 2020, que define critérios e procedimentos para a produção e aplicação de biossólido em solos (BRASIL, 2020).

Nesse contexto, essa nota técnica (NT) tem como objetivo apresentar de forma consolidada os principais pontos de interesse referentes ao processo de compostagem de lodo de esgoto, sendo eles: (i) fundamentos do processo de compostagem; (ii) aspectos operacionais relacionados a composição da mistura e ao controle das condições do processo; e (iii) qualidade do biossólido produzido, em termos químicos e sanitários. Além da compostagem, nas NTs 4 (ANDREOLI *et al.*, 2022) e 5 (RIETOW *et al.*, 2022) desta coletânea são apresentados os processos de estabilização alcalina e secagem térmica, respectivamente, os quais também possibilitam a higienização do lodo e seu uso como biossólido na agricultura, tema abordado na NT 6 (BITTENCOURT *et al.*, 2022a), e em recuperação de áreas degradadas, tema abordado na NT 7 (CHAMHUM-SILVA *et al.*, 2022).

2. FUNDAMENTOS DO PROCESSO

Compostagem pode ser definida como o processo aeróbio por meio do qual se obtém a decomposição controlada de resíduos orgânicos, transformando-os em material parcialmente humificado. Segundo Matos (2014), dentre as vantagens que a compostagem pode trazer aos materiais submetidos ao processo, podem ser citadas:

- Estabilização bioquímica, tornando-os isentos de maus odores e menos atrativo a vetores de doenças.
- Maior conservação de macro e micronutrientes no composto produzido, uma vez que a maturação do material orgânico é obtida com a transformação de formas químicas sujeitas à volatilização ou lixiviação em outras mais estáveis.
- Inibição de patógenos responsáveis por algumas doenças em plantas, animais e seres humanos, em razão da ocorrência de altas temperaturas (até 65-70 °C) durante a fase termofílica de degradação do material orgânico.
- Obtenção de um material orgânico adequado à melhoria das características físicas, químicas e biológicas do solo, quando é incorporado a esse. A matéria orgânica é capaz de promover aumento na agregação entre as partículas do solo, proporcionando o aumento de sua macroporosidade (poros de maior diâmetro) e de sua aeração, beneficiando o crescimento radicular das plantas. A

incorporação de compostos orgânicos ajuda a neutralizar a acidez e a aumentar a capacidade de troca catiônica (CTC) dos solos, além de favorecer o desenvolvimento da biomassa e atividade microbiana, que podem causar alterações na estrutura, diversidade e abundância das comunidades microbianas nesse meio (LIU *et al.*, 2017; SCIUBBA *et al.*, 2014). Essas mudanças podem ser associadas às mudanças nas capacidades funcionais das comunidades microbianas do solo (FIERER *et al.*, 2012) que podem alterar a fertilidade e, como consequência, a produtividade agrícola nos solos receptores de composto.

O processo de compostagem é desenvolvido em pilhas ou em leiras, lançando mão da ação de uma população diversificada de microrganismos e é caracterizado por duas fases distintas:

1. **Degradação ativa** (necessariamente termofílica): nessa primeira fase ocorrem reações bioquímicas de oxidação mais intensas e, como essas são exotérmicas, a temperatura varia entre 45 e 65 °C. A duração dessa fase é de 5 a 60 dias, a depender de como é conduzido o processo (PEREIRA NETO, 1996).
2. **Maduração ou “cura”**: nessa segunda fase ocorre o processo de humificação do material orgânico e mineralização do carbono remanescente (lignina, celulose etc.). A temperatura do material é reduzida para a faixa mesofílica, entre 35 e 45 °C, e a duração dessa fase é de 60 a 90 dias (MATOS, 2014).

Na **Figura 1** é apresentado um exemplo genérico da evolução da temperatura em uma leira em processo de compostagem.

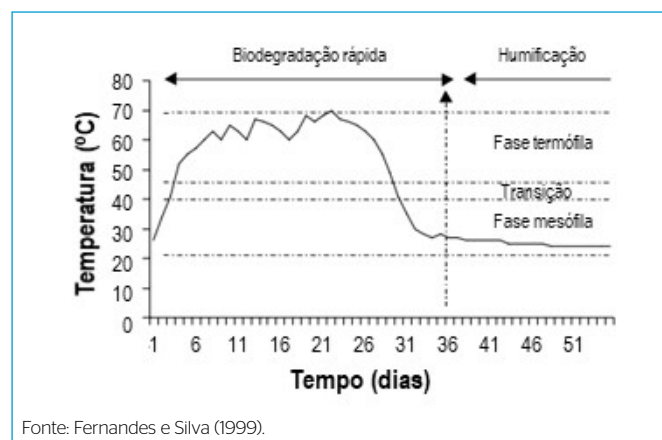


Figura 1 – Comportamento da temperatura durante processo de compostagem.

Segundo Matos (2014), os fatores que afetam a compostagem são:

- **Taxa de oxigenação (aeração)**: a adequada aeração da massa em compostagem é necessária para que haja aumento na eficiência do processo, possibilitando o fornecimento do oxigênio necessário para a oxidação do material orgânico, a redução na emissão de maus odores, além de proporcionar a ocorrência de altas temperaturas na pilha ou leira, devido ao aumento das reações bioquímicas causado pelo fornecimento de oxigênio. A aeração do material pode se dar através do reviramento (manual ou mecânico) da pilha ou leira, por aeração passiva ou através da insuflação forçada de ar atmosférico na massa em compostagem.
- **Temperatura**: o monitoramento da temperatura na massa de material em compostagem é fundamental para que se possa ter uma ideia do equilíbrio biológico no meio, o que também reflete na eficiência do processo. O controle da temperatura na primeira fase (termofílica) acima de 55 °C é vantajoso e desejável, pois possibilita a eliminação de sementes de ervas daninhas, ovos de parasitas e microrganismos patogênicos. Quando a temperatura baixa, permanecendo em, no máximo, 10 a 15 °C acima da temperatura ambiente, considera-se que a compostagem tenha entrado na fase mesofílica.
- **Conteúdo de água**: a decomposição do material orgânico é dependente do conteúdo de água nesse meio, uma vez que a sua disponibilidade é fundamental para a atividade microbiológica. Altos conteúdos de água (maiores que 65%) estão, entretanto, associados à excessiva ocupação dos espaços vazios da massa com água, impedindo a livre passagem de ar, o que pode conduzir à ocorrência de condições anaeróbias no meio. Por outro lado, baixos conteúdos de água (menores que 40%) inibem a atividade microbiológica, diminuindo a taxa de degradação do material orgânico. O ideal é que o conteúdo de água no material constituinte das leiras de compostagem seja mantido em torno de 55%.
- **Concentração de nutrientes**: o crescimento e a diversificação da população microbiana na massa em compostagem se relacionam diretamente com a concentração de nutrientes presentes no meio. Assim, atenção

especial deve ser dada ao teor de macronutrientes - carbono e nitrogênio - na mistura de materiais orgânicos constituintes das leiras, já que a relação entre esses elementos químicos ((relação Carbono/ Nitrogênio - C/N) é considerada fator crítico no processo. Se a relação C/N for muito alta, haverá imobilização do N disponível na massa de material pelos microrganismos; se a relação C/N for baixa, haverá grande perda de N na forma de amônia caso o pH no meio seja alto. Em geral, há um consenso de que a taxa ótima para a relação C/N para início do processo de compostagem seja de 25 a 35:1, o que determinará a rápida degradação bioquímica do material, diminuindo o período de tempo demandado para maturação final do composto (FERNANDES e SILVA, 1999; MATOS, 2014; PEREIRA NETO, 1996).

- **Tamanho da partícula:** quanto mais fragmentado o material, maior será sua área superficial sujeita ao ataque de microrganismos, aumentando a taxa com que ocorre sua degradação bioquímica e, com isso, diminuindo o período de compostagem do material. A diminuição no tamanho da partícula poderá, entretanto, proporcionar redução da macroporosidade, proporcionando auto-compactação da leira, dificultando a circulação e saída dos gases desprendidos e a entrada e circulação do ar atmosférico. Considera-se o tamanho ideal de partículas na faixa de 30 a 50 mm. A compostagem de material fino exige a sua mistura com material mais grosseiro (estruturante), tendo em vista que isso é essencial para que ocorra a adequada aeração do material da leira de compostagem.
- **pH:** embora não seja um fator crítico no processo, o pH do material deve permanecer na faixa ótima para desenvolvimento dos microrganismos, ou seja, próxima à neutralidade. Entretanto, em razão da mineralização do material orgânico, o pH do material tende a aumentar com o tempo, e permanecer entre 7,5 e 9,0 ao final do período de compostagem.

3. ASPECTOS OPERACIONAIS

A compostagem é uma alternativa natural de tratamento do lodo de esgoto sanitário, que promove a sua estabilização

e higienização, tendo como produto um insumo de alto valor agrônomo, o bio sólido. Embora seja uma forma importante de higienização do lodo de esgoto, ainda não há muita informação na literatura científica sobre esse processo. Em sequência, a fim de garantir a eficiência do processo de compostagem, são discutidos os principais aspectos de interesse referentes à composição da mistura, à aeração, à eficiência e ao controle das condições do processo.

3.1. Composição da mistura

Na Resolução CONAMA nº 481/2017 (BRASIL, 2017) ficou estabelecido que lodos de ETEs podem ser utilizados na produção de composto orgânico; e de acordo com a Resolução CONAMA nº 498/2020 (BRASIL, 2020), a compostagem é um processo de higienização aceitável para esse fim. No entanto, para a compostagem do lodo de esgoto sanitário, torna-se necessária sua mistura com outros materiais orgânicos de maior granulometria, a fim de proporcionar maior porosidade ao meio.

Além disso, a mistura de materiais de baixa e alta relação carbono/nitrogênio (C/N) tem sido recomendável, visando-se formar uma massa com concentrações de ambos os elementos mais favoráveis ao desenvolvimento da população microbiana e, conseqüentemente, à degradação bioquímica mais rápida dos materiais orgânicos. O lodo de esgoto normalmente possui baixa relação C/N e, por isso, a esse deve ser misturado resíduos de alta relação C/N, como os resíduos agrícolas e agroindustriais (folhas mortas, capim picado, palha, sabugo, pó-de-serra e cavacos de madeira, bagaço de frutas, tortas, cascas etc.), os quais atuarão como materiais estruturantes, proporcionando os benefícios já comentados anteriormente.

A proporção na mistura do lodo de esgoto com o outro resíduo (material estruturante), considerando-se a relação C/N ideal, como no caso de quaisquer outros resíduos, pode ser obtida conforme recomendado por Matos (2014) (Equação 1):

$$C/N = \frac{C_{Lodo} + (C_{Estr} \times X)}{N_{Lodo} + (N_{Estr} \times X)} \quad (1)$$

Na qual: C/N - valor estabelecido para preparo das misturas; C_{Lodo} e C_{Estr} - teores de carbono orgânico no lodo e material estruturante (base em ST¹), respectivamente; N_{Lodo} e N_{Estr} - teores de nitrogênio no lodo e material estruturante, respectivamente; X - proporção de participação do material estruturante em relação a uma parte do lodo de esgoto.

O **Exemplo 1** seguinte ilustra o cálculo da proporção de material estruturante na mistura com lodo de esgoto, considerando a relação C/N ideal. Uma vez que a produção de lodo é contínua em uma ETE, é importante verificar também uma fonte para disponibilizar o material estruturante, que suporte a demanda mássica da mistura continuamente.

Exemplo 1: Calcular a proporção de material estruturante em relação a parcela de lodo de esgoto, para se efetuar sua compostagem conjunta.

Dados de entrada:

- Teores de carbono orgânico e nitrogênio no lodo (C_{Lodo} e N_{Lodo}), base em ST: 16,0% de C e 1,8% de N
- Teores de carbono orgânico e nitrogênio no material estruturante (C_{Estr} e N_{Estr}), base em ST: 55,0% de C e 0,4% de N.
- Relação C/N estabelecida para preparo da mistura: 30

Solução:

Determinação da proporção de participação do material estruturante em relação a parcela de lodo de esgoto (X):

$$C/N = \frac{C_{Lodo} + (C_{Estr} \times X)}{N_{Lodo} + (N_{Estr} \times X)} \rightarrow 30 = \frac{16,0 + (55,0 \times X)}{1,8 + (0,4 \times X)} \rightarrow X = 0,88$$

Assim, a cada 1 t de lodo seco deve ser misturada 0,88 t de ST do material estruturante.

3.2. Aeração e eficiência do processo

Na compostagem em pilhas e leiras, para a adequada aeração e eficiência do processo, são utilizados métodos de reviramento do material, ou o uso de leiras estáticas aeradas (forçadas e passivas).

3.2.1. Reviramento das leiras

No processo de compostagem por reviramento, manual ou mecânico, as pilhas (**Figura 2a**) ou leiras (**Figura 2b**) da mistura de materiais devem possuir de 1,0 a 1,8 m de altura e 1,0 a 4,0 m de base. O reviramento da massa, nos 30 primeiros dias de compostagem deve ser feito a cada 3 dias, pois nesse período a temperatura do material aumenta consideravelmente e a demanda por oxigênio é alta. Assim, com seu reviramento, dissipa-se parte da energia térmica acumulada e consegue-se fornecer o oxigênio requerido através da aeração do meio. Do 30º ao 60º dia, como a intensidade das reações diminui muito, o reviramento pode passar a ser feito a cada 5 dias (MATOS, 2014).

Segundo Matos (2014) e Pereira Neto (1996), a maturação do material geralmente ocorre após 90 - 120 dias, dependendo da relação C/N inicial na mistura e dos

cuidados durante o processo. Sob o ponto de vista gerencial, estima-se a necessidade de um operário por dia para cada tonelada de composto orgânico produzido. A mecanização do processo de reviramento é, entretanto, possível, podendo ser utilizados tratores ou máquinas especificamente construídas para esse fim.

3.2.2. Leiras estáticas com aeração forçada

Na compostagem de resíduos orgânicos utilizando-se o processo de leiras estáticas aeradas, o ar é introduzido de forma forçada na massa em compostagem, prática utilizada para que se possa substituir o seu reviramento na fase de degradação ativa do material orgânico (MATOS, 2014).

Por meio desse método, a mistura de materiais permanece estática durante a sua degradação mais ativa, sendo o oxigênio, fundamental para manter o meio em condições aeróbias, introduzido com a utilização de compressores (ventilador centrífugo), por meio de dutos de aeração posicionados abaixo das pilhas/leiras de material. Como nesse processo a fase termofílica dura de 25 a 30 dias, ao seu final a pilha/leira pode ser desmontada, sendo o material colocado para maturação por 60 a 90 dias, período em que é apenas revirado e molhado (MATOS, 2014).

¹ Base em ST: referência ao teor de sólidos totais da amostra em questão, isto é, material residual após remoção de umidade da amostra.



Figura 2 – Vista de pátio contendo pilhas (a) e leiras (b) de compostagem.

Potência demandada pelo sistema de ventilação

De acordo com o mesmo autor, a potência demandada pelo ventilador depende da quantidade de material a ser aerado, sendo função da vazão específica mássica (vazão do ar por unidade de massa) e da perda de carga proporcionada pelo material. A vazão específica mássica recomendada é de 70 a 1.200 m³.h⁻¹ de ar por tonelada de ST a ser aerado; enquanto a perda de carga (pressão) é decorrente da vazão específica de ar, do gradiente de pressão (que depende da forma e tamanho das partículas, do conteúdo de água no material, do grau de compactação do material e do estágio de degradação do material) e da altura da pilha/leira.

Silva *et al.* (2008) observaram considerável efeito do estágio de degradação do material orgânico em compostagem (bagaço de cana-de-açúcar misturado com cama de frango) na perda de pressão do ar insuflado. Além do comportamento exponencial positivo com o aumento na vazão específica do ar, as perdas de pressão aumentaram com o tempo de maturação do composto orgânico. Matos *et al.* (2012) não encontraram, no entanto, diferença nas curvas de gradiente de pressão em função da vazão específica em misturas de casca de café com cama de frango, antes e após serem submetidos ao processo de compostagem.

Na **Tabela 1** são apresentadas as representações matemáticas do gradiente de pressão do ar na coluna de mistura de material e da potência demandada pelo ventilador, conforme **Equações 2 e 3**, respectivamente.

Tabela 1 – Representações matemáticas do gradiente de pressão do ar na coluna de mistura de material e da potência demandada pelo ventilador.

Equação	Observações
$\Delta P = A_1 \times Q_a^{B_1} \quad (2)$ *Equação de Shedd	ΔP: gradiente de pressão estática (Pa.m⁻¹) Q_a: vazão específica do ar por unidade de área da leira (m³.s⁻¹.m⁻²) A_1 e B_1: parâmetros obtidos no ajuste do modelo aos dados experimentais
$Pot = \frac{\Delta P \times H \times Q}{\eta} \quad (3)$	Pot: potência elétrica absorvida pelo ventilador (W) ΔP: gradiente de pressão, o qual aumenta linearmente com a altura de material na pilha/leira (Pa.m⁻¹) H: altura da pilha/leira (m) Q: vazão de ar aplicada (m³.s⁻¹) η: rendimento do ventilador (adimensional)

Fonte: Matos (2014)

Medidas de gradiente de pressão do ar, quando insuflado em colunas formadas pela mistura de cama de frango com bagaço de cana-de-açúcar ou casca de café, proporcionaram o ajuste das equações obtidas por Teixeira *et al.* (2015), apresentadas na **Tabela 2**.

Tabela 2 – Parâmetros obtidos no ajuste do gradiente de pressão estática (ΔP) e vazão específica de ar ($\dot{Q}_a$) de acordo com a equação de Shedd, para misturas no início e final da fase termofílica.

Misturas	Tempo de compostagem (dias)	Equação
Bagaço de cana-de-açúcar + cama de frango	0	$\Delta P = 7.244 \times \dot{Q}_a^{1,186}$
	30	$\Delta P = 6.929 \times \dot{Q}_a^{1,255}$
Casca de café + cama de frango	0	$\Delta P = 4.434 \times \dot{Q}_a^{1,324}$
	30	$\Delta P = 3.472 \times \dot{Q}_a^{1,316}$

Fonte: Teixeira *et al.* (2015).

O **Exemplo 2** seguinte ilustra o cálculo da potência de um ventilador a ser utilizado para a compostagem.

Exemplo 2: Calcular a potência de um ventilador a ser utilizado para a compostagem de 10 t de ST de mistura de bagaço de cana-de-açúcar e cama de frango.

Dados de entrada:

- Vazão específica de ar ($\dot{Q}_a$): $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
- Altura das leiras (H): 1,8 m
- Eficiência de ventiladores (η): 60% (faixa de 50 a 70%)

Solução:

a) Determinação do gradiente de pressão (ΔP):

De acordo com a Tabela 2, o gradiente de pressão em pilhas da mistura de bagaço de cana-de-açúcar e cama de frango, nas suas condições iniciais é:

$$\Delta P = 7.244 \times \dot{Q}_a^{1,186} \Rightarrow \Delta P = 7.244 \times (0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})^{1,186} = 472 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$$

b) Determinação da vazão de ar aplicada (Q):

Considerando que a mistura (base em ST), apresente uma massa específica de $185 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ e que as leiras têm 1,8 m de altura, para a compostagem de 10 t de ST será necessária uma área de contato com o piso de 30 m^2 . Dito isto, a vazão de ar aplicada será de $3,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \times 30 \text{ m}^2$).

c) Determinação da potência demandada pelo ventilador (Pot):

$$\text{Pot} = \frac{\Delta P \times H \times Q}{\eta} = \frac{472 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1} \times 1,8 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}}{60\%} = 4.248 \text{ W} = 5,8 \text{ cv}$$

d) Potência demandada pelo ventilador por unidade de ST (Pot/t):

$$\text{Pot/t} = \frac{P}{ST} = \frac{4.248 \text{ W}}{10 \text{ t}} = 424,8 \text{ W} \cdot \text{t}^{-1}$$

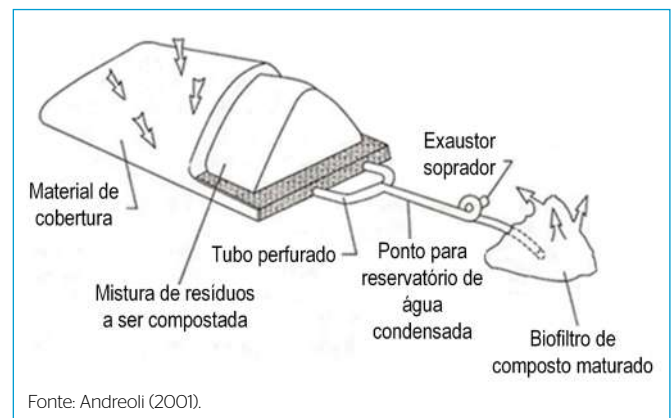
Com base nos valores obtidos por Teixeira *et al.* (2015), as demandas de potência para insuflação de ar, sob vazão específica de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ de mistura (base em ST) de bagaço de cana-de-açúcar ou casca de café misturados com cama de frango, do início ao final de 30 dias de compostagem, devem ficar na faixa de 70 a $200 \text{ W} \cdot \text{t}^{-1}$ de material, sendo obtidas maiores demandas quanto maior a massa específica da mistura, maior quantidade de material fino e mais inicial estiver o estágio de degradação bioquímica do material. Segundo Pinto

(2001), a demanda de potência pelo ventilador, por tonelada de ST de lodo de esgoto é de $820,6 \text{ W} \cdot \text{t}^{-1}$ ($1,1 \text{ cv} \cdot \text{t}^{-1}$).

No que se refere ao efeito do tempo de compostagem do material na demanda de potência do ventilador, ocorrem efeitos que atuam de forma inversa, que tornam essa demanda de potência relativamente constante. Segundo Matos (2014), embora o adensamento natural do material possa proporcionar aumento na perda de pressão do ar, a diminuição na altura da pilha de material aparentemente compensa esse efeito.

Operação do sistema de ventilação

No que se refere ao sentido do escoamento do ar, o sistema de ventilação pode operar sob sucção, insuflação, ou de forma alternada, ora insuflação, ora sucção. Na **Figura 3** está apresentado o esquema ilustrativo de um sistema de compostagem em leiras estáticas aeradas, no qual o ar é succionado para o interior da massa.



Fonte: Andreoli (2001).

Figura 3 – Esquema ilustrativo de um sistema de compostagem em leiras estáticas aeradas submetidas à sucção.

A insuflação, também denominada de escoamento sob pressão positiva, proporciona menor perda de pressão (carga) de ar, porém maior ressecamento do material, do que quando o sistema de ventilação é operado em sucção. Uma das razões é o aumento na temperatura do ar, decorrente do trabalho de compressão que nele é exercido pelo ventilador, proporcionando o ressecamento das camadas mais próximas do duto de aeração, tornando a distribuição da água muito desuniforme na massa.

A sucção, também denominada de escoamento sob pressão negativa, proporciona maior perda de pressão (carga) de ar, em virtude da formação de placas de material junto aos dutos de aeração, provocando seu parcial selamento. Essas placas são formadas quando material de menor granulometria (“finos”) se junta com água; forma uma argamassa e ocupa os poros de aeração do material da leira (MATOS, 2014).

A alternância de insuflação e sucção é, por essa razão, a forma de operação do sistema que proporciona uma distribuição mais homogênea da água contida na massa, diminuindo, portanto, as demandas de recarga. Segundo Matos (2014), durante a insuflação com ar umedecido há aumento no conteúdo de água das camadas mais próximas ao duto de aeração. Ao se desligar o sistema de ventilação, parte da água migrará para o topo onde se condensará, formando uma camada mais úmida. Ao se efetuar a sucção, haverá transporte da água do topo para o interior da massa, proporcionando ressecamento da camada mais próxima do duto de aeração. Assim, com alternância no sentido de escoamento do ar, seriam minimizadas as necessidades de interferência no sistema para se efetuar correções e a homogeneização no conteúdo de água do material, o que é operacionalmente muito vantajoso.

3.2.3. Leiras estáticas com aeração passiva

A compostagem com aeração passiva ocorre com uso de tubulações de PVC (normalmente de 0,1 m de diâmetro, com perfurações de 2,5 cm de diâmetro) instalados nas pilhas ou leiras de compostagem, no intuito de otimizar as forças convectivas criadas pelas diferenças de temperatura entre o material em compostagem e o ambiente. Esta alternativa envolve menor necessidade de trabalhadores e custos operacionais comparados com os métodos de reviramento das leiras e de aeração forçada. De acordo com Sartaj *et al.* (1997), a técnica é mais efetiva, econômica e superior na conservação do nitrogênio no composto que o método de aeração forçada.

Os tubos perfurados podem ser posicionados horizontalmente ou verticalmente e configurados em diferentes formas, como em “V” ou “T invertido”, no intuito de beneficiar a distribuição do ar e, assim, alcançar uma

taxa de compostagem uniforme em toda a pilha ou leira de compostagem (FERNANDES *et al.*, 1994; SARTAJ *et al.*, 1997; KIEHL, 1998).

No que se refere ao mecanismo de aeração passiva, Ogunwande e Osunade (2011) ressaltam que o bom funcionamento do sistema de aeração através das tubulações de PVC é dependente não apenas da orientação do tubo de ventilação, mas também da forma e diâmetro dos furos, os quais devem ser adequadamente posicionados na tubulação para fornecer o fluxo de oxigênio aos microrganismos para suportar as atividades microbianas.

3.3. Controle das condições do processo

A manutenção de temperaturas termofílicas controladas, na fase de degradação ativa, é um dos requisitos básicos do processo, uma vez que somente por meio desse controle é que se pode conseguir o aumento na sua eficiência, ou seja, aumento na velocidade de degradação e eliminação dos microrganismos patogênicos (PEREIRA NETO, 1996). Diante da importância da temperatura na inativação de patógenos, está estabelecido na Resolução CONAMA nº 481/2017 (BRASIL, 2017) que, na higienização por meio do processo de compostagem, a temperatura deve ser medida e registrada ao menos uma vez por dia durante o período mínimo de higienização (fase termofílica), conforme indicado na **Tabela 3**.

Tabela 3 – Tempo e temperatura necessários para higienização dos resíduos sólidos orgânicos, incluindo lodo de esgoto, durante o processo de compostagem.

Sistema de compostagem	Temperatura (°C)	Tempo (dias)
Sistemas abertos	> 55	14
	> 65	3
Sistemas fechados (<i>in vessel</i>)	> 60	3

Fonte: Brasil (2017)

O reviramento das pilhas tem as funções básicas de, além de propiciar a aeração da massa, dissipar as altas temperaturas geradas na fase ativa de degradação e expor o material externo às altas temperaturas internas. Pereira Neto (1996) indicou que um ciclo de reviramento de três em três dias durante a fase termofílica é satisfatório e que,

durante a fase mesofílica o reviramento não é necessário. Matos (2014), por outro lado, afirmou que durante esta segunda fase, o reviramento pode passar a ser feito a cada cinco dias.

A compostagem pelo método das pilhas, das leiras ou das leiras estáticas aeradas, pode ser realizada em área coberta ou descoberta, devendo ser feita uma avaliação considerando-se os custos da estrutura e da cobertura. Nesse local, dependendo do volume e de questões operacionais, o material poderá ser arranjado em pilhas ou leiras. Estando a área coberta ou não, o piso necessariamente deve ser impermeabilizado por concreto, asfalto ou material equivalente. Recomenda-se, também, que toda a água pluvial que escoe do pátio de compostagem seja coletada em canaletas e conduzida até um tanque de armazenamento. No caso de áreas abertas, o tanque de armazenamento deverá ser dimensionado de acordo com a área impermeabilizada e a estimativa de uma precipitação de máxima intensidade, tomando-se por base um período de recorrência de 5 a 10 anos. A água coletada e armazenada nesses tanques deverá ser utilizada para molhar o material das leiras ou pilhas de compostagem, sempre que for necessário o restabelecimento do seu conteúdo de água (MATOS, 2014).

De acordo com Matos (2014), a área necessária de pátio de compostagem pode ser calculada utilizando-se a **Equação 4**.

$$A_T = A_{BL} \times N \times 2 \times f \quad (4)$$

Na qual: A_{BL} - área da base de cada leira (m^2); N - número de leiras concomitantes no pátio. Ao se considerar um tempo de compostagem de 120 dias, $N = 120.T_F^{-1}$, em que T_F é o tempo de fornecimento de novos lotes de material orgânico (adimensional); 2: constante que inclui área igual para reviramento das leiras (m^2); f - folga na área para possibilitar trânsito de máquinas e pessoas. Comum adotar de 10 a 15% ou até mais.

4. QUALIDADE DO COMPOSTO ORGÂNICO PRODUZIDO

Durante a compostagem, amostras devem ser retiradas em pelo menos três pontos da pilha ou leira (topo, meio e meio da base), igualmente afastados entre si (**Figura 4**). O equipamento de amostragem (trados com

diâmetro maior que duas vezes o diâmetro das partículas presentes nas pilhas e que tenham comprimento maior que 1,2 m) deverá ser penetrado obliquamente nas pilhas ou leiras de compostagem para que se possa efetuar essa coleta.

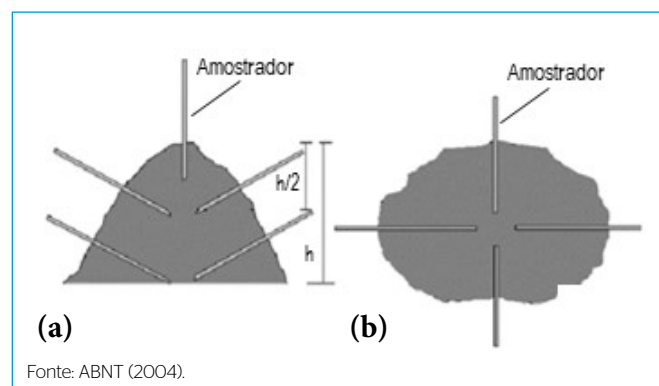


Figura 4 – Detalhe da coleta em pilha, segundo a NBR 10.007/2004: (a) corte transversal; (b) vista de planta.

De acordo com o que está estabelecido na resolução CONAMA nº 481/2017, o processo de compostagem deve garantir uma relação C/N final no composto orgânico menor ou igual a 20. E como o objetivo principal da aplicação do composto no solo é o fornecimento de matéria orgânica e/ou nutrientes para o desenvolvimento vegetal, deve-se estar atento para as características específicas do material, para que não venha a trazer riscos para o meio ambiente. As variáveis de importância a se analisar em um composto orgânico a ser disposto no solo são: o teor de nutrientes e de metais pesados; a presença de outros contaminantes químicos; e a concentração de microrganismos patogênicos, conforme critérios definidos pela Resolução CONAMA nº 481/2017 (BRASIL, 2017).

Como na Resolução CONAMA nº 481/2017 (BRASIL, 2017) não foram estabelecidos critérios de qualidade no que se refere a agentes patogênicos, neste item serão utilizados referenciais de qualidade estabelecidos na Resolução CONAMA nº 498/2020 (BRASIL, 2020), atinentes à qualidade do bio sólido para uso em solo, além de experiências de diversos autores em relação aos resultados obtidos na compostagem do lodo de esgoto sanitário.

4.1. Qualidade química

Para caracterização química do biossólido a ser utilizado para aplicação no solo, de acordo com a Resolução CONAMA n° 498/2020, deve ser realizada a análise das seguintes variáveis: nitrogênio total, nitrogênio amoniacal, nitrato, nitrito, arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, molibdênio, níquel, selênio e zinco, dentre outras a serem definidas no Plano de Gerenciamento da Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL), conforme as particularidades de cada unidade.

No caso de composto orgânico produzido com lodo de esgoto sanitário, o nitrogênio, o cálcio e o fósforo, geralmente estão presentes em maiores teores que em outros resíduos. O lodo de esgoto sanitário apresenta, no entanto, baixo teor de potássio, logo, para o uso agrícola do biossólido produzido há que se proceder uma complementação com outra fonte deste elemento para nutrição de plantas (MATOS, 2014). Alguns outros elementos químicos presentes no biossólido, mesmo que relativamente em baixos teores, são benéficos (p. ex.: ferro, cobre, zinco e níquel são considerados essenciais às plantas e aos microrganismos do solo), mas outros fitotóxicos² ou não essenciais às plantas (p. ex.: cádmio, chumbo, cromo e mercúrio).

Biossólido proveniente de ETEs localizadas em cidades com grande parque industrial podem conter altos teores de metais pesados, os quais, portanto, devem ser considerados quando da definição das doses de sua aplicação no solo. Entretanto, após serem adicionados ao solo pela incorporação do biossólido, os metais podem assumir as formas solúvel, trocável, fixada (adsorção específica ou quimissorção) pelos minerais do solo, além de formar precipitados ou complexos/quelatos com a matéria orgânica, não ficando disponíveis para serem absorvidos pelas plantas e microrganismos.³

Bortolini (2018) obteve relação C/N média final de 15,1 e teores de 2,76; 0,13; e 3,77%, respectivamente, de N, Fósforo (P) e Potássio (K) no biossólido (base em ST) produzido a partir da mistura de lodo de esgoto sanitário com casca de café. Além disso, o produto apresentou-se adequado em termos de pH, de acordo com os teores de carbono

orgânico total (COT), nitrogênio e relação C/N, estipulados na Instrução Normativa (IN) n° 25/2009 (BRASIL, 2009), para comercialização de fertilizantes orgânicos.

Silva (2007) realizou a compostagem, utilizando-se o método das leiras com aeração passiva, de lodo de esgoto (gerado em reator UASB) da ETE Mangueira (Recife-PE) e resíduos de jardinagem (folhas secas) do campus da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), formando misturas com relações C/N de 29, 42 e 21, nas proporções de mistura lodo/material estruturante de 1:1, 1:2 e 2:1, respectivamente. Os teores finais obtidos de N, P e K no composto orgânico (base em ST) apresentaram-se, respectivamente, na faixa de 1,4 a 1,7; 0,16 a 0,17; 0,6 a 0,7%, enquanto o pH foi de 5,9 a 6,2. Na **Figura 5** são mostradas as pilhas de experimentos de Silva (2007) e de Lyra *et al.* (2018).

4.2. Qualidade microbiológica

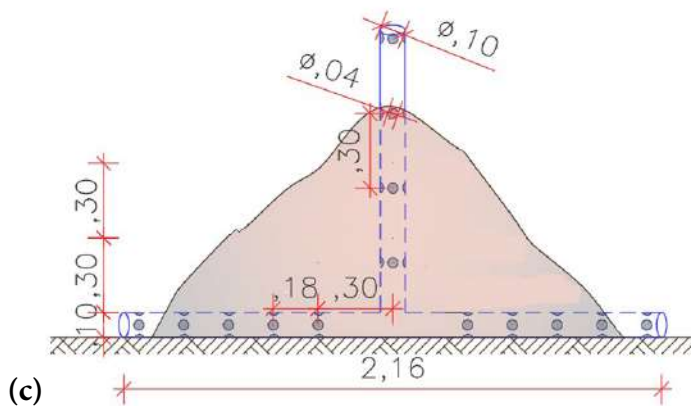
Para caracterização sanitária do biossólido, a ser destinado para uso em solos, deverá ser atendido o limite máximo de *Escherichia coli* estabelecido pela Resolução CONAMA n° 498/2020 (BRASIL, 2020), conforme consta na **Tabela 4**, e ser proveniente de um dos processos de redução de patógenos descritos na referida Resolução, de acordo com sua classificação (Classe A ou B).

Caso a fase termofílica tenha sido conduzida de forma adequada, não se espera a sobrevivência de microrganismos de risco sanitário em compostos orgânicos, nem mesmo de ovos de helmintos. Diversos estudos foram desenvolvidos para se avaliar a qualidade microbiológica passível de se alcançar por meio do processo de compostagem da mistura do lodo de esgoto sanitário e outro substrato, estando esses resultados sumarizados na **Tabela 5**.

A partir das informações apresentadas na Tabela 5, conclui-se que, de forma geral, no lodo compostado nos diversos experimentos não foi detectada a presença de vírus entéricos e *Salmonella*. No tocante à contagem de ovos viáveis de helmintos, observou-se que, na maioria dos casos, foram obtidas contagens inferiores a 0,25 ovos.g⁻¹ST, com exceção do resultado apresentado por Mengistu *et al.* (2018).

² Ação tóxica que uma substância provoca nas plantas, isto é, prejudica o desenvolvimento da planta.

³ Esses conceitos são apresentados na NT7 dessa coletânea (CHAMHUM-SILVA *et al.*, 2021).



Fonte: Silva (2007) e Lyra *et al.* (2018).

Figura 5 – Detalhe da montagem das pilhas de compostagem naturalmente aerada utilizando tubo T perfurado (a) e vista das pilhas formadas (b). Experimento piloto conduzido durante vigência do INCT ETEs Sustentáveis (c e d) (medidas expressas em metros).

Tabela 4 – Padrões de qualidade microbiológica para biossólido a ser usado em solos, de acordo com a Resolução CONAMA nº 498/2020.

Classe	Contagem de patógenos
A	<i>Escherichia coli</i> : $< 10^3 \cdot g^{-1}$ ST e ser proveniente de um dos processos de redução de patógenos descritos na Resolução, para lodo classe A.
B	<i>Escherichia coli</i> : $< 10^6 \cdot g^{-1}$ ST ou ser proveniente de um dos processos de redução de patógenos descritos na Resolução, para lodo classe B.

A contagem de coliformes termotolerantes obtida após a compostagem, por sua vez, foi inferior a 10^6 NMP·g⁻¹ST em todos os experimentos e inferior a 10^3 NMP·g⁻¹ST em três dos cinco estudos, em que esse parâmetro foi avaliado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso agrícola do lodo de esgoto é uma das formas mais nobres de sua destinação final, tendo em vista que segue importantes preceitos da economia circular, disponibilizando um produto de alta qualidade e que oferece inúmeros benefícios ao solo e aos cultivos nele efetuados. E ainda, pode trazer retorno econômico às empresas responsáveis por esse gerenciamento e/ou ao produtor rural. Entretanto, para que essa forma de uso seja legal e segura, a prática da higienização tem que ocorrer, sendo a compostagem uma das alternativas recomendáveis, por: (i) exigir estruturas simples; (ii) não necessitar da adição de insumos químicos; (iii) apresentar baixo consumo energético; e (iv) atender aos

Tabela 5 – Síntese de estudos que avaliaram a qualidade microbiológica do lodo compostado.

Variáveis de qualidade microbiológica	Contagem de patógenos no lodo bruto	Contagem de patógenos no lodo compostado	Tempo de compostagem (dias)	Tipo de compostagem	Substrato	Referência
Ovos viáveis de helmintos ^(a)	1,9x10 ²	0,12 (1:1) ^(e)	67	Leiras estáticas com aeração passiva	Folhas secas provenientes de varrição	Silva (2007)
		0,03 (1:2) ^(e)				
		0,21 (2:1) ^(e)				
Ovos viáveis de helmintos ^(a)	0,24	Ausente	20	Leiras estáticas com aeração natural	Resíduos orgânicos alimentares, resíduos de poda vegetal e maravalha	Teixeira (2012)
Coliformes termotolerantes ^(b)	1,0x10 ⁵	7,4x10 ³				
<i>Salmonella</i> ^(c)	Ausente	Presente em 20% das amostras				
Vírus entéricos ^(d)	Ausente	Ausente	3 dias a 70 °C			
Vírus entéricos ^(d)	Ausente	Ausente	6 dias a 60 °C			
Ovos viáveis de helmintos ^(a)	N.D.	Ausente	165	Leiras aeradas por reviramento	Resíduos orgânicos domiciliares e resíduos de poda vegetal	Heck et al. (2013)
Coliformes totais ^(b)	N.D.	3,4x10 ⁵				
Coliformes termotolerantes ^(b)	N.D.	4,0x10 ⁴				
<i>Salmonella</i> ^(c)	N.D.	Ausente				
Vírus entéricos ^(d)	N.D.	Ausente				
Ovos viáveis de helmintos ^(a)	0,27	0,05	86	Leiras aeradas por reviramento	Bagaço de cana, resíduos de poda vegetal e resíduo de celulose	Leite (2015)
Coliformes termotolerantes ^(b)	2,5x10 ³					
<i>Salmonella</i> ^(c)	Ausente	Ausente				
Ovos viáveis de helmintos ^(a)	-48,5	-8,3	100	Leiras aeradas por reviramento	Resíduos orgânicos domiciliares	Mengistu et al. (2018)
Coliformes termotolerantes ^(b)	-5,0x10 ⁴	-3,0x10 ²				
Ovos viáveis de helmintos ^(a)		Ausente	126	Leiras aeradas por reviramento	Casca de café	Bortolini (2018)
Coliformes termotolerantes ^(b)		2,0x10 ²				
<i>Salmonella</i> ^(c)		Ausente				
Vírus entéricos ^(d)		Ausente				

Notas: ^(a)Ovos.g⁻¹ ST; ^(b)NMP.g⁻¹ ST; ^(c)NMP.10⁻¹.g⁻¹ST; ^(d)Unidades formadoras de flocos.g⁻¹ST; ^(e)proporção da mistura de lodo/folhas secas; N.D.: Não determinado.

padrões físicos, químicos e microbiológicos exigidos pela legislação pertinente.

Uma vez que o biossólido é um adubo orgânico, ele deve ser tratado como fertilizante, dessa forma, a sua disposição no solo deve seguir critérios agrônômicos, baseados nas características químicas do solo e nos requerimentos da cultura que se quer adubar.

Biossólido pode ser aplicado na produção agrícola (culturas anuais e perenes), em áreas de reflorestamento, parques e jardins e recuperação de áreas degradadas (mineração, aterros sanitários). Por fim, conclui-se que o lodo de esgoto é um subproduto muito nobre para que não seja aproveitado no processo produtivo de alimentos e na recuperação ambiental. Estas duas práticas são temas

específicos abordados nas NTs 6 (BITTENCOURT *et al.*, 2022a) e 7 (CHAMHUM-SILVA *et al.*, 2022) desta Coletânea.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis.

Este trabalho faz parte da série de publicações do INCT ETEs Sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 10007: Amostragem de resíduos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004. 21 p.
- ANDREOLI, C. V. *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. Rio de Janeiro, Brasil: Rima Artes e Textos, 2001. 287 p.
- ANDREOLI, C. V.; BICO, A. K.; BITTENCOURT, S.; PEGORINI, E. S.; POSSETTI, G. R. C.; CERQUEIRA, P. L. W.; RIETOW, J. C.; AISSE, M. M. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo - Nota Técnica 4 - Higienização de lodo via estabilização alcalina. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 45-58, 2022.
- ANDREOLI, C. V.; von SPERLING, M.; FERNANDES, F. *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 484 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuais, v. 6)
- BITTENCOURT, S.; MATOS, A. T.; SILVA, B. S.; OLIVEIRA, F. C.; CHAMHUM-SILVA, L. A.; MIKI, M. K.; BICO, A. K. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo - Nota Técnica 6 - Uso agrícola de biossólido. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 75-87, 2022.
- BORTOLINI, R. L. R. *Composto orgânico de lodo de reator UASB e casca de café: qualidade e oportunidades para produção e uso agrícola em Minas Gerais*. 2018. 123 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa nº 25, de 23 de julho de 2009. Normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura. Brasília, DF, 2009.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Brasília, DF, 2020.
- BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 481, de 03 de outubro de 2017. Estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, e dá outras providências. Brasília, DF, 2017.
- BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei Federal nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, 2010.
- CHAMHUM-SILVA, L. A.; SILVA, J. B. G.; OLIVEIRA, L. S.; BORGES, M. N.; LIMA, T. G.; BITTENCOURT, S.; MATOS, A. T. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo - Nota Técnica 7 - Recuperação de áreas degradadas. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 89-101, 2022.
- FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. *Manual prático para a compostagem de biossólidos*. 1ª ed. Paraná, Brasil: Universidade Federal de Londrina, Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB), 1999. 84 p.
- FERNANDES, L.; ZHAN, W.; PATNI, N. K.; JUI, P. Y. Temperature distribution and variation in passively aerated static compost piles. *Bioresource Technology*, v. 48, n. 3, p. 257-263, 1994.
- FIERER, N.; LAUBER, C. L.; RAMIREZ, K. S.; ZANEVELD, J.; BRADFORD, M. A.; KNIGHT, R. Comparative metagenomic, phylogenetic and physiological analyses of soil microbial communities across nitrogen gradients. *The ISME Journal*, v. 6, p. 1007-1017, 2012.
- FYTILI, D.; ZABANIOTOU, A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods - a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 12, n. 1, p. 116-140, 2008.
- HECK, K.; DE MARCO, E. G.; HAHN, A. B. B.; KLUGE, M.; SPIÇKI, F. R.; SAND, S. T. V. D. Temperatura de degradação de resíduos em processo de compostagem e qualidade microbiológica do composto final. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 1, p. 54-59, 2013.
- KIEHL, E. J. *Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto*. Piracicaba, Brasil, 1998. 171 p.
- LEITE, T. A. Compostagem termofílica de lodo de esgoto: higienização e produção de biossólido para uso agrícola. 2015.

186 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

LIU, X.; LIU, W.; WANG, Q.; WU, L.; LUO, Y.; CHRISTIE, P. Soil properties and microbial ecology of a paddy field after repeated applications of domestic and industrial sewage sludges. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 24, n. 9, p. 8619-8628, 2017.

LYRA, G. R. F. ; BONFIM, N. F. ; RIBEIRO, M. H. G. ; GAVAZZA, S. ; FLORENCIO, L. ; LEITE, W. R. M. ; KATO, M. T. Higienização de lodo de esgoto sanitário por processo de caleação e compostagem termofílica. In: *1º Seminário Nacional Sobre Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto*, 2018, Curitiba, Brasil. INCT ETES Sustentáveis, 2018.

MATOS, A. T. *Tratamento e aproveitamento agrícola de resíduos sólidos*. Viçosa, Brasil: Editora UFV, 2014. 241 p.

MATOS A. T.; TEIXEIRA, D. L.; RIBEIRO, I. C.; PAIVA, E. C. R.; LACERDA FILHO, A. F. Demanda de potência do ventilador para aeração de material em compostagem. *Engenharia Agrícola*, v. 32, n. 3, p. 542-551, 2012

MENGISTU, T.; GEBREKIDAN, H.; KIBRET, K.; WOLDETSADIK, K.; SHIMELIS, B.; YADAV, H. Comparative effectiveness of different composting methods on the stabilization, maturation and sanitization of municipal organic solid wastes and dried faecal sludge mixtures. *Environmental Systems Research*, v. 6, n. 5, 2018.

OGUNWANDE, G. A.; OSUNADE, J. A. Passive aeration composting of chicken litter: Effects of aeration pipe orientation and perforation size on losses of compost elements. *Journal of Environmental Management*, v. 92, n. 1, p. 85-91, 2011.

PEREIRA NETO, J. T. *Manual de Compostagem - Processo de Baixo Custo*. Belo Horizonte, Brasil: UFV, SLU, UNICEF, 1996. 81 p.

PINTO, M. T. Higienização de lodos. In: Andreoli, C. V.; von Sperling, M.; Fernandes, F. In: Andreoli, C. V.; von Sperling, M.; Fernandes, F. (Org.). *Lodo de esgoto: tratamento e disposição final*. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental,

Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 484 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuais, v. 6)

RIETOW, J. C.; POSSETTI, G. R. C.; LOBATO, L. C. S.; ANDREOLI, C. V.; CARNEIRO, C.; BICO, A. K.; WAGNER, L. G.; AISSE, M. M. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo - Nota Técnica 5 - Secagem e higienização térmica de lodo em diferentes portes de ETES. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 59-74, 2022.

SARTAJ, M.; FERNANDES, L.; PATNI, N. K. Performance of forced, passive, and natural aeration methods for composting manure slurries. *Transactions of the ASAE*, v. 40, n. 2, p. 457-463, 1997.

SCIUBBA, L.; CAVANI, L.; NEGRONI, A.; ZANAROLI, G.; FAVA, F.; CIAVATTA, C.; MARZADORI, C. Changes in the functional properties of a sandy loam soil amended with biosolids at different application rates. *Geoderma*, v. 221-222, p. 40-49, 2014.

SILVA, N. C. L.; MATOS, A. T.; SARTORI, M.; MOREIRA, D. A.; BARROS, R. T. P.; LUIS, F. A. R. Variação na pressão estática de ar insuflado em diferentes vazões específicas em colunas de material orgânico com diferentes estádios de degradação bioquímica. *Acta Scientiarum, Agronomy*, v. 30, p. 165-170, 2008.

SILVA, R. F. *Compostagem e solarização para higienização de lodo de esgoto e uso no cultivo de cassia amarela (Senna siamea Lam)*. 2007. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

TEIXEIRA, C. *Higienização do lodo de estação de tratamento de esgoto por compostagem termofílica para uso agrícola*. 2012. 143 f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas). Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

TEIXEIRA, D. L.; MATOS, A. T.; MELO, E. C. Resistance to forced airflow through layers of composting organic material. *Waste Management*, v. 36, p. 57-62, 2015.

Parte A: Higienização e uso de lodo de esgoto no solo

Nota Técnica 4 – Higienização de lodo via estabilização alcalina

Part A: Sanitization and use of sewage sludge in soil
Technical Note 4 - Sludge sanitization by alkaline stabilization

**Cleverson Vitório Andreoli^{1*}, Alexandre Klas Bico², Simone Bittencourt³,
Eduardo Sabino Pegorini⁴, Gustavo Rafael Collere Possetti⁵,
Pedro Lindstron Wittica Cerqueira⁶, Julio Cezar Rietow⁷, Miguel Mansur Aisse⁸**

RESUMO

A estabilização alcalina (EA) é um dos processos mais difundidos no mundo para a higienização do lodo produzido no tratamento de esgoto, embora seja ainda pouco empregado no Brasil. A não obrigatoriedade de uma destinação ambientalmente sustentável do lodo de esgoto e uma série de fatores econômicos, técnicos e operacionais acabam limitando a realização da EA. Com a Resolução CONAMA nº 498/2020, amplia-se o potencial de aumento da destinação agrícola de biossólido no país e com maior aprofundamento das questões técnicas e operacionais da prática, a tecnologia de EA poderá ser mais difundida. A presente nota técnica (NT) apresenta as principais formas de armazenamento e aplicação de cal, assim como os parâmetros mínimos necessários para o dimensionamento de pátios de maturação/cura. Esta NT também discorre sobre os custos intrínsecos à EA e sobre as melhores práticas de engenharia utilizadas, visando à redução de eventuais problemas e à maximização do seu emprego em todo o território nacional.

Palavras-chave: cal; elevação do pH; higienização alcalina; homogeneização da mistura; tempo de contato.

ABSTRACT

Alkaline stabilization (AS) is one of the most widespread processes in the world for the sanitization of sludge produced in sewage treatment, although in Brazil it is used by only a few sanitation companies. The fact that an environmentally sustainable destination for sewage sludge is not mandatory, as well as a series of economic, technical and operational factors, end up limiting the AS process application. The increase of AS practices are expected due to the the Brazilian CONAMA Resolution nº 498/2020, which aims to increase the use of biosolids in agriculture and to further deepen technical and operational knowledge related to this practice. This technical note (TN) presents the main forms of the storage and application of lime, as well as the minimum parameters required for designing maturation and curing yards. In this TN, the intrinsic AS costs and best engineering practices used are discussed, in view of reducing possible problems and maximizing its usage throughout the national territory.

Keywords: lime; pH increase; alkaline sanitization; homogenization of the blend; contact time.

¹Engenheiro Agrônomo, Mestre em Ciências do Solo e Doutor em Meio Ambiente e Desenvolvimento pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Professor do Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade do ISAE. Diretor da Consultoria e Engenharia Ambiental (CEA).

²Agrônomo pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR).

³Engenheira Agrônoma, Mestre em Agronomia e Doutora em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Profissional da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). Professora do Curso de Gestão Ambiental da Faculdade Fael.

⁴Engenheiro Agrônomo, pós-graduado em Engenharia da Produção e Mestre em Agronomia pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Profissional da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar).

⁵Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) e Engenheiro Eletricista pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Mestre e Doutor em Ciências pela UTFPR. Profissional da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). Professor do Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade do ISAE. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

⁶Engenheiro Civil pela Universidade Positivo. Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Profissional da Companhia de Saneamento de Goiás (Saneago).

⁷Engenheiro Ambiental e de Segurança do Trabalho pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). Mestre e doutorando em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

⁸Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (USP). Doutor em Engenharia Hidráulica pela Universidade de São Paulo (USP). Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental na Universidade Federal do Paraná (UFPR).

***Endereço para correspondência:** Avenida Visconde de Guarapuava, 2943 – Instituto Superior De Administração e Economia do Mercosul (ISAE) – Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade. Curitiba, PR. CEP: 80010-100. e-mail: cleverson@andreoliambiental.com.br

1. INTRODUÇÃO

O lodo de esgoto é um subproduto sólido do processo de tratamento de esgoto sanitário e caracteriza-se por ser um material rico em matéria orgânica e nutrientes. Entretanto, também possui contaminantes como metais pesados e, sobretudo, agentes patogênicos (PEGORINI *et al.*, 2007). Dessa forma, para garantir a segurança sanitária de seu uso em solos é necessário que o lodo de esgoto seja tratado por processos de redução de patógenos, como estabelece a Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020 (BRASIL, 2020). Sendo tema de diversas pesquisas no Brasil, os processos de higienização demonstram que fatores como baixa umidade, elevada temperatura e elevado pH podem reduzir a sobrevivência dos organismos patogênicos no lodo (POSSETTI *et al.*, 2012).

Um dos processos de higienização capaz de transformar o lodo de esgoto em um biossólido de uso seguro em solos é o tratamento com adição de material alcalino. Denominado de calagem ou caleação, ou ainda estabilização alcalina (EA), o processo de adição de material alcalino no lodo de esgoto permite a elevação do pH e da temperatura na mistura, possibilitando uma redução significativa de agentes patogênicos (ANDREOLI *et al.*, 2001). Além de estabilização do lodo, o processo EA reduz os problemas com odor e ainda permite que o material corrija a acidez de solos, que geralmente são ácidos no Brasil, podendo reduzir ou substituir o uso de calcário utilizado para tal finalidade (POMPEO *et al.*, 2016).

O emprego do processo de EA no Brasil é restrito a poucas unidades federativas, como, por exemplo, São Paulo, Rio Grande do Sul, Distrito Federal e Paraná (SAMPAIO, 2010). Tal fato se deve pela baixa adesão desta alternativa pelas empresas de saneamento, sendo que a falta de investimentos, de infraestrutura, de capacitação técnica e de dificuldade de atendimento aos critérios e procedimentos do uso agrícola do lodo de esgoto estabelecidos pela antiga Resolução CONAMA nº 357, de 29 de agosto de 2006 (BRASIL, 2006), são os principais fatores que limitaram o emprego da EA no Brasil.

Diante do exposto, o conhecimento do processo de EA do lodo de esgoto, bem como de outras alternativas de higienização, tais como secagem térmica e compostagem,

em consonância com a Resolução CONAMA nº 498/2020, se torna essencial para viabilizar o uso agrícola do biossólido. Nesse sentido, o objetivo desta nota técnica (NT) é discorrer sobre os principais pontos de interesse atinentes ao processo de EA, sendo eles: (i) fundamentos do processo; (ii) aspectos operacionais relacionados as formas de armazenamento, dosagem e aplicação do material alcalino, e pátios de cura; (iii) aspectos econômicos vinculados a essa alternativa; e (iv) principais problemas encontrados durante a realização do processo. Além da EA, nas NTs 3 (MATOS *et al.*, 2022) e 5 (RIETOW *et al.*, 2022) desta coletânea são apresentados os processos de compostagem e secagem térmica, respectivamente, os quais também possibilitam a higienização do lodo e seu uso como biossólido na agricultura, tema abordado na NT 6 (BITTENCOURT *et al.*, 2022a).

2. FUNDAMENTOS DO PROCESSO

A adição de produtos químicos alcalinos tem efeito estabilizante e desinfetante sobre o lodo de esgoto. Os produtos usualmente empregados no processo de EA são: cal virgem (composto principalmente pelas substâncias químicas CaO e MgO), cal hidratada (composto por $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e $\text{Mg}(\text{OH})_2$) e cinzas (composto pela mistura de óxidos de Ca, Mg, K, entre outros). No que se refere ao material alcalino, dois tipos de cales são usualmente empregados no processo de EA: a calcítica e a dolomítica. A cal calcítica possui menos de 5% de óxido de magnésio (MgO), enquanto a cal dolomítica possui mais de 12% de MgO. A cal dolomítica possui reatividade e poder de neutralização mais baixo em comparação com a cal calcítica (PEGORINI *et al.*, 2006a). O MgO apresenta limitada reatividade em condições ambientais e não provoca, por si só, efeito sobre o pH no lodo. Em condições ambientais, somente o CaO sofre reação de hidratação, sendo a mais indicada para aplicação em lodo na fase sólida (GODINHO, 2003), produzindo calor e, consequentemente, elevando a temperatura do material. Cabe destacar que o magnésio é um importante macronutriente para a agricultura, o que o torna um fator importante a ser considerado, uma vez que se pretenda fazer com que o uso agrícola seja o principal destino do lodo de esgoto no País. Ainda que a

dosagem de cal deva ser feita apenas em função do CaO, é interessante considerar o uso de cal dolomítica quando possível, especialmente quando o bio sólido for aplicado em solos pobres em magnésio ou mesmo para promover o equilíbrio de nutrientes.

Contudo, para a inativação de patógenos, o efeito das temperaturas alcançadas com as dosagens usuais é baixo, sendo necessários outros fatores para a higienização do lodo, sendo eles: a elevação do pH e a ação da amônia (NH_3). Em pH elevado, parte do nitrogênio presente no lodo é convertido em NH_3 , que inativa e destrói vários agentes patogênicos, incluindo os ovos de helmintos, que geralmente são as formas mais resistentes presentes no lodo. Desse modo, a elevação do pH na mistura para níveis superiores a 12 causa alteração na natureza coloidal do protoplasma celular dos microrganismos, criando um ambiente desfavorável para sobrevivência dos mesmos (ANDREOLI *et al.*, 2001).

As principais vantagens e desvantagens do processo de EA estão apresentadas na **Tabela 1**.

O processo de EA também é responsável por reduzir a concentração de sólidos voláteis (SV) no lodo. Isto se deve pela perda de orgânicos voláteis para a atmosfera, bem como pelo aumento de sólidos totais (ST) no material em razão do acréscimo de sólidos do material alcalino e da precipitação de sólidos dissolvidos (SD). Adicionalmente, durante o processo de EA é comum ocorrer a fixação de metais pesados no lodo, a não solubilização de fósforo e perdas de nitrogênio por volatilização da amônia (NH_3) (ANDREOLI *et al.*, 2001). Embora essencial para o processo

de higienização, a liberação de NH_3 constitui um dos principais problemas da EA devido a liberação de fortes odores durante o período de cura do lodo. Desse modo, torna-se fundamental prever um sistema de confinamento e inativação de odores para mitigar esse problema nas ETes e em sua circunvizinhança.

Além da elevação do pH, o lodo deve ter um período de contato suficiente para que a redução de patógenos atinja seu nível ótimo. Esse período é extremamente relevante para garantir o limite máximo de 1×10^3 *Escherichia coli*.g⁻¹ de ST, para o bio sólido Classe A, e de 1×10^6 *Escherichia coli*.g⁻¹ de ST, para o bio sólido Classe B. Maiores informações sobre os usos das diferentes classes de bio sólido podem ser consultadas na **NT 2** desta coletânea (BITTENCOURT *et al.*, 2022b). A Resolução CONAMA nº 498/2020 propõe diferentes processos de EA para redução de patógenos e obtenção de bio sólido, tanto Classe A como Classe B, conforme apresentado na **Tabela 2**. De acordo com Andreoli *et al.* (2001), o período de contato ótimo para garantir a obtenção de um bio sólido Classe A é de 30 dias, razão pela qual o processo é denominado estabilização alcalina prolongada (EAP). Para um bio sólido Classe B, onde o seu uso segue padrões menos restritivos de aplicação, o período mínimo de contato estabelecido pela Resolução CONAMA nº 498/2020 é de 2 horas.

Dentre os vários benefícios da Resolução CONAMA nº 498/2020, que revogou e substituiu a Resolução CONAMA nº 375/2006, destaca-se a definição do indicador microbiológico *Escherichia coli* como critério de higienização e classificação do bio sólido.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens do processo de EA.

Vantagens	Desvantagens
• Processo bem-estabelecido e comprovado. • Tecnologia simples, requer poucas habilidades especiais para uma operação confiável. • Facilidade de construção e de aquisição de insumos e componentes. • Ocupa pouco espaço. • Operação flexível, fácil de ser iniciada e interrompida. • Pode produzir bio sólido Classes A ou B (conforme resolução CONAMA nº 498/2020). • O produto final apresenta elevado potencial como corretivo de acidez de solos. • Adição dos macronutrientes vegetais Ca e Mg ao solo.	• O produto final não pode ser empregado em todos os tipos de solos, especialmente naqueles que já sofreram processo de correção do PH. • Aumento do volume de sólidos que precisa ser manuseado ou transportado de 15 a 50% em comparação com outras alternativas de estabilização. • O aumento no volume resulta em maiores custos de transporte quando o lodo deve ser removido do local. • Geração de odor tanto na fase de processamento como no local de aplicação devido à liberação de amônia (NH_3). • Emissão de particulados finos (pó). • Menor quantidade de nitrogênio no produto final devido à volatilização de NH_3. • A disponibilidade fósforo também pode ser reduzida devido à formação de fosfato de cálcio.

Fonte: Andreoli *et al.* (2001); Metcalf e Eddy (2016); US EPA (2003)

Tabela 2 – Processos para obtenção de biossólido Classe A e Classe B por meio do processo de EA.

Biossólido	Processos
Classe A	- Processos que proporcionem elevação do pH ($\text{pH} > 12$, por pelo menos 72 horas) e da temperatura ($T > 50^\circ\text{C}$, 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 menor que 50%, após o período de 72 horas da mistura do material alcalino. - Também se refere a processos que relacionam tempo e pH, mas que não seja o apresentado na primeira linha dessa coluna. Esses processos dependem de validação, ou seja, de comprovação por meio de resultado de pesquisas, sendo necessária a comprovação das condições que garantam um biossólido com menos de 1 ovo viável de helminto por grama de ST. Mediante essa comprovação, os parâmetros de controle operacional do processo podem ser utilizados como indicadores da produção de classe A, não sendo necessário quantificar ovos de helmintos no biossólido. Mas, para a sua validação, é necessária a aprovação de um plano de amostragem detalhado pelo órgão ambiental competente. - Processo de pasteurização, com a utilização de material alcalino para manutenção do lodo de esgoto a uma temperatura mínima de 70°C, por um período de pelo menos 30 minutos. - Lodo tratado em processos não especificado. Esta alternativa é aplicada somente a biossólido a ser destinado em lotes. A caracterização de ovos viáveis de helmintos deve ser realizada no momento da formação do lote de biossólido e sua presença deverá ser menor que 1 ovo viável de helminto por grama de ST. - O lodo de esgoto sanitário é tratado por um outro processo comprovadamente equivalente a um processo de redução adicional de patógenos, com a utilização de material alcalino, e aceito pelo órgão ambiental competente.
Classe B	- 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. - Lodo tratado em um processo equivalente a um processo de redução adicional de patógenos. O lodo de esgoto sanitário é tratado por um outro processo comprovadamente equivalente a um processo de redução significativa de patógenos e aceito pelo órgão ambiental competente.

Fonte: Brasil (2020).

Ao contrário da avaliação da presença de ovos de helmintos requisitada pela antiga resolução, que demandava minimamente um período de análise de 30 dias, a *Escherichia coli* pode ser mensurada em um intervalo de tempo menor, diminuindo, dessa forma, o tempo e a área requerida das ETEs e/ou Unidades de Gerenciamento de Lodo (UGLs) para armazenamento do biossólido. Obviamente, variações sazonais de demanda agrícola na região onde se pretende aplicar o biossólido podem impactar no período de estocagem do material.

Na **Figura 1** é apresentado um fluxograma com as principais etapas do processo de EA para produção de biossólido. Estas etapas poderão se desenvolver na ETE ou em uma Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL) devidamente licenciada pelo órgão ambiental competente, na qual se realiza o gerenciamento para transformação de lodo gerado por uma ou mais ETEs em biossólido. Os aspectos operacionais referentes as etapas de armazenamento e aplicação (dosagem e mistura) da cal, de maturação/cura e de estocagem do biossólido são discutidos no item seguinte. Na **NT 6** dessa coletânea são apresentados os principais aspectos referentes ao uso de lodo na agricultura, incluindo as informações que devem constar do projeto agrônomo (BITTENCOURT *et al.*, 2022).

3. ASPECTOS OPERACIONAIS

3.1. Armazenamento da cal

A forma de armazenamento da cal dependerá principalmente do porte das ETEs ou UGLs. Em unidades de pequeno porte, a cal virgem geralmente é comprada em sacos de 20 kg, ficando armazenada em depósitos cobertos (**Figura 2a**). O produto deve ser mantido em um ambiente livre de umidade, de inundação e de goteiras, sendo esses aspectos de fundamental relevância para garantir a qualidade da cal e evitar possíveis acidentes provocados por uma eventual elevação de temperatura. Além disso, os sacos de cal virgem não podem ser empilhados sobre estrados e/ou *pallets* de madeira. Isto se deve por esses materiais se caracterizarem como potenciais combustíveis em caso de incêndio. Em alguns casos, a cal virgem é transportada a granel e armazenada em montes sob locais cobertos. Quando isso ocorre, além das orientações anteriormente citadas de armazenamento, é necessário que os montes não sejam envolvidos por elementos estruturais de qualquer natureza. Por sua vez, em unidades de grande e médio porte, onde o consumo de cal virgem é elevado, é comum o emprego de silos para armazenamento do material (**Figura 2b**).

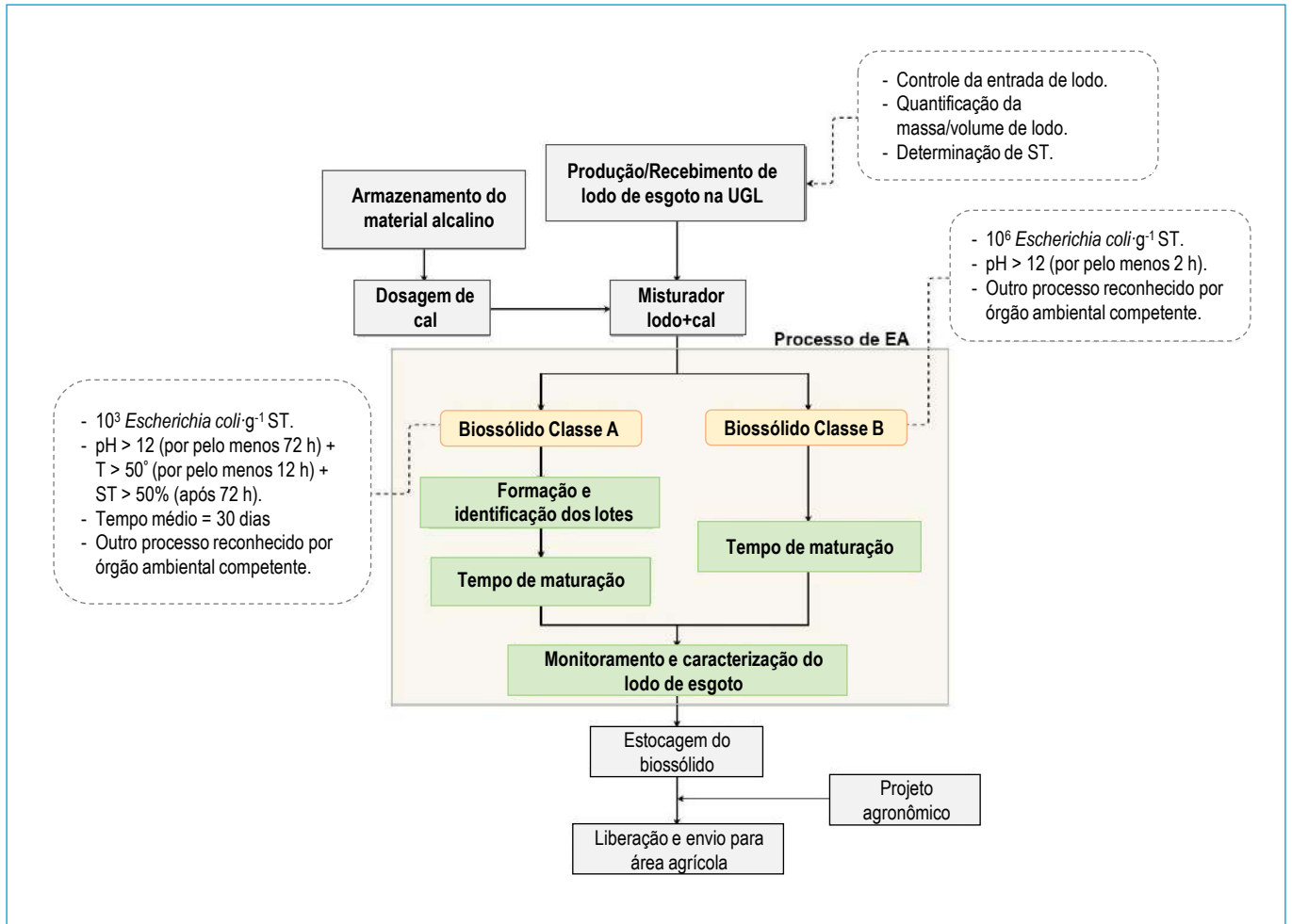


Figura 1 – Etapas do processo de gerenciamento do lodo de esgoto e obtenção de biossólido por EA para fins de uso agrícola.



Figura 2 – Armazenamento da cal virgem: (a) para ETEs de pequeno porte, em sacos de 20 kg; (b) para ETEs de grande e médio porte são empregados silos.

Comumente localizado ao lado da edificação de desaguamento do lodo, o silo de cal pode ser confeccionado em concreto de alta qualidade, aço (mais usual) ou outro material de comprovada resistência, e deve possuir fragmentador¹ no seu cone inferior a fim de assegurar o escoamento da massa de cal. A proporção de cal que é misturada ao lodo, bem como a sua logística de fornecimento regional, impacta diretamente no dimensionamento do silo. Isto posto, um bom critério para determinar o volume dessa instalação é considerar uma capacidade estocada de cal suficiente para sete dias de tratamento do lodo (ANDREOLI *et al.*, 2001). Durante a operação é prudente a realização de limpezas preventivas periódicas (5 anos) nos silos, visando, principalmente, a remoção do material acumulado nas paredes, o que acarreta a redução do volume útil dessas unidades. Adicionalmente, destaca-se a importância da manutenção das condições de largura da pista e acesso para manobra de caminhões longos para descarga de cal no silo.

Aplicação da cal (dosagem e mistura)

Independente do sistema de armazenamento adotado na ETE ou UGL, a dosagem de cal a ser aplicada no lodo deverá ser aquela capaz de fazer com que o pH da mistura alcance e mantenha um valor igual ou superior a 12 por um período compatível com a classe de lodo pretendida. De acordo com estudos realizados no âmbito do Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB), entre os anos de 1996 e 2009, as dosagens ótimas de cal virgem encontradas variaram entre 30 e 50% em relação a massa de sólidos totais (ST) de lodo (ANDREOLI *et al.*, 2001). Contudo, cabe destacar que cales calcínicas possuem um teor de CaO superior a 88%, requerendo, dessa forma, dosagens inferiores se comparadas com as cales dolomíticas, sendo que essas apresentam teores de CaO, em média, inferiores a 60%. Nesse sentido, estudos conduzidos por Pegorini *et al.* (2006b) comprovaram que dosagens de 30% de CaO (aproximadamente 50% de cal virgem) foram suficientes para higienização do lodo de esgoto.

Além do pH, a adição de CaO no lodo é responsável pelo aumento significativo de temperatura na mistura. Dependendo do teor de ST no lodo a ser higienizado e da dosagem de CaO empregada, o aumento de temperatura na mistura pode ultrapassar valores de 50°C. Lodos mais secos demandam menor quantidade de CaO para alcalinização e manutenção do pH, enquanto lodos mais úmidos necessitam de uma dosagem maior devido a elevada presença de água no meio. Sendo assim, a eficiência do processo de EA é maior em lodos mais secos, desde que haja moléculas de água suficientemente disponíveis para que a cal possa reagir e ocasionar o aquecimento da mistura. Recomenda-se, portanto, que a adição de CaO deva ser realizada em lodo com teor de ST variando entre 20 e 35%. Teores de ST superiores a esses podem ocasionar, em caso de elevada dosagem de cal virgem, a autoignição e/ou combustão do lodo de esgoto.

Um dos fatores determinantes para eficiência da EA é o processo de homogeneização da cal no lodo. Ao optar por um tipo de processo, é necessária considerar a capacidade de geração de lodo, o emprego de equipamentos que promovam uma mistura homogênea e o destorroamento do lodo, proporcionando ainda uma minimização da dispersão de poeiras. Neste sentido, apresentam vantagens os misturadores com carregamento mecanizado acompanhados de roscas ou esteiras transportadoras de lodo bruto, silo de cal, dosador de cal de rosca ou esteira transportadoras de lodo caleado, acionados de forma articulada.

As companhias de saneamento no Brasil, que realizam o processo de EA, têm adotado diferentes alternativas de mistura, sendo que essas estão diretamente relacionadas com o porte da planta de tratamento. Em algumas ETEs de pequeno porte é comum a adoção da mistura manual da cal com o lodo, sendo utilizadas pá e enxada (**Figura 3a**). Após a homogeneização do material são feitos montes de lodo, sempre que possível fora do sistema de desaguamento, evitando, dessa forma, eventuais problemas de colmatção dos materiais drenantes.

¹ O fragmentador pode funcionar de forma mecânica (vibradores acoplados a porção cônica devidamente preparada) ou por pulsos de ar comprimido. Neste último caso, é fundamental a desumidificação do ar para evitar a inserção de umidade no silo. Isso pode ser feito empregando acessos herméticos e filtro manga para a eliminação da massa de ar na descarga dos caminhões.

A temperatura nos montes de lodo deve ser acompanhada com certa frequência, uma vez que identificado o decaimento da mesma torna-se imprescindível uma nova mistura do material. Três mudanças de local são suficientes para garantir uma boa homogeneização. Devido a uma

possível dificuldade na mistura da massa, ressalta-se que o emprego de pá e enxada é um método pouco eficiente. Sendo assim, recomenda-se utilizar este método em ETES de pequeno porte quando não se dispõe de outras formas de homogeneização.



Figura 3 – Alternativas de homogeneização do lodo com a cal: (a) manual; (b) betoneira; (c) maromba; (d) enxada rotativa; (e) retroescavadeira; (f) misturador mecânico horizontal (eixo central e pás do tipo arado com tempo de detenção mínimo de 3 minutos).

O uso de betoneira (**Figura 3b**) também se mostra como uma alternativa usualmente empregada em ETEs de pequeno porte para a homogeneização da cal com o lodo. Recomenda-se que a betoneira seja carregada com a mistura adequada desses materiais, ocupando aproximadamente 40% do volume útil do equipamento. O processo deverá ser realizado por um período mínimo de 3 minutos, ou até que a cal esteja visivelmente homogeneizada à massa de lodo. Outro equipamento que pode ser empregado em ETEs de pequeno porte é a maromba (**Figura 3c**). Semelhante ao misturador utilizado na indústria de cerâmica, a maromba possui funcionamento contínuo e pode ser acoplada a uma esteira rolante para facilitar a remoção de lodo dos leitos de secagem. Além disso, esse misturador pode ser empregado com processos mecanizados de desaguamento (p. ex.: centrífugas ou filtros prensa).

Além de equipamentos como betoneiras e marombas, ETEs de pequeno e médio porte também podem realizar o processo de mistura entre cal e lodo por meio de enxadas rotativas (**Figura 3d**) e retroescavadeiras (**Figura 3e**). Contudo, destaca-se que a eficiência do processo de homogeneização por esses equipamentos, assim como na alternativa manual, é dificultada pela necessidade constante de revolvimento do material. Por fim, tratando-se de ETEs de grande e médio porte, para o processo de homogeneização podem ser adotados misturadores mecânicos (**Figura 3f**) de diferentes modelos (p. ex.: eixos paralelos com estrias, eixo central e pás do tipo arado duplo). Esses misturadores permitem uma elevada eficiência de homogeneização, uma vez que também são empregados dispositivos de dosagem de cal.

Cuidados essenciais devem ser tomados em ETEs que empregam misturadores mecânicos. Para evitar o

empedramento da cal nas roscas transportadoras, o misturador deve ser provido de um ponto para descarga de vapor d'água e de pó, sendo esses comumente gerados durante a operação de mistura. Adicionalmente, recomenda-se que as roscas de transporte de cal e lodo devem possuir um sistema motoredutor nas extremidades de descarga desses materiais, garantindo uma distância mínima de 10 cm em relação ao final do bocal de descarga do selo mecânico, evitando, dessa forma, uma eventual quebra da rosca transportadora. No que se refere à questão de segurança, recomenda-se que a área onde a unidade de mistura está implantada deve ter disponível um chuveiro lava-olhos para atendimento a situações de emergência com cal.

O ponto de entrada de cal é normalmente o local de maior desgaste do misturador mecânico (abrasão física associada à corrosão pela elevação do pH). Desse modo, é comum que o equipamento, ao longo do tempo de uso, perca capacidade de arraste da mistura caleada. Recomenda-se, portanto, a realização de um plano para verificação preventiva e eventual substituição do dispositivo. Por fim, anteriormente ao processo de mistura, deve-se empregar roscas sem eixo ou esteiras para transporte do lodo, evitando, dessa forma, o estrangulamento da passagem de lodo ao longo do dispositivo. Roscas com eixo possuem mancais intermediários que podem estreitar a passagem da massa de lodo ocasionado desgastes por abrasão. Assim, as roscas para transporte de lodo devem ser do tipo U, com fechamento superior que permita remoção completa para limpeza, possuindo ainda um bocal inferior para esgotamento do material.

O **Exemplo 1** ilustra os cálculos referentes a estimativa de cal necessária para o processo de estabilização alcalina e de biossólido produzido.

Exemplo 1: Estimar a quantidade de cal necessário para o processo de estabilização alcalina e de biossólido produzido em uma ETE dotada de reatores UASB.

Dados de entrada:

- População (P): 50.000 hab.
- Produção mássica unitária de lodo (MU_{lodo}): 15 g ST·hab⁻¹·d⁻¹
- Massa específica do lodo (γ): 1.020 kg·m⁻³
- Teor de sólidos totais (ST) no lodo bruto (%ST): 4%
- Teor de ST no lodo após desaguamento em centrífuga (%ST): 20%
- Eficiência de captura de sólidos na centrífuga (Cs): 95%
- Cal predominante na região: calcítica
- Teor de CaO (%CaO): superior a 80%
- Dosagem de CaO a ser aplicada (D_{CaO}): 30% em relação à ST do lodo

Solução:

a) Estimativa da produção mássica (MB_{lodo}) e volumétrica de lodo bruto (V_{lodo}):

$$MB_{\text{lodo}} = MU_{\text{lodo}} \times P = 15 \text{ gST} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \times 50.000 \text{ hab} = 750 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$V_{\text{lodo}} = \frac{MB_{\text{lodo}}}{\%ST \times \gamma} = \frac{750 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1}}{4\% \times 1.020 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} = 18 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$$

b) Estimativa da massa de lodo após o desaguamento em centrífuga (MD_{lodo}):

$$MD_{\text{lodo}} = MB_{\text{lodo}} \times Cs = 750 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1} \times 95\% = 712 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1}$$

c) Estimativa da massa de lodo, com 20% de ST após a centrífuga (M_{lodo}):

$$M_{\text{lodo}} = \frac{MD_{\text{lodo}}}{\%ST} = \frac{712 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1}}{20\%} = 3.560 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1} \text{ de torta}$$

d) Estimativa da quantidade de CaO (Q_{CaO}):

$$Q_{\text{CaO}} = M_{\text{lodo}} \times D_{\text{CaO}} = 712 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1} \times 30\% = 213 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1} \text{ de CaO}$$

e) Quantidade de Cal a ser aplicada (Q_{cal}):

$$Q_{\text{cal}} = \frac{Q_{\text{CaO}}}{\%CaO} = \frac{213 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1} \text{ de CaO}}{80\%} = 266 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1} \text{ de cal}$$

f) Quantidade de biossólido produzido (Q_{lodo}):

$$Q_{\text{lodo}} = M_{\text{lodo}} + Q_{\text{cal}} = 3.560 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1} \text{ de torta} + 266 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1} \text{ de cal} = 3.826 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1} \text{ de biossólido}$$

3.2. Pátios de maturação/cura e estocagem do biossólido

A necessidade e as dimensões de pátio para maturação/cura do lodo após a mistura dependem do tipo de processo de tratamento por EA e da forma com que o lodo será destinado - em lote ou continuamente. A situação de destinação de forma contínua pode ser exemplificada no caso de uma UGL que adota o processo de redução de patógenos por pasteurização com adição de material alcalino. Após 30 minutos submetido a uma temperatura de 70° C, o biossólido formado nesse processo poderá ser descarregado em uma caçamba, a qual após preenchida será destinada com determinada frequência para uma área agrícola de

aplicação. Nesse caso, não há necessidade de uma área de pátio, para maturação e cura, mas sempre é recomendável a existência de um pátio para armazenamento. Isto é recomendável devido à eventuais problemas operacionais, climáticos e de sazonalidade agrícola que impeçam a destinação do biossólido conforme programado. Em ETEs de maior porte, este pátio é indispensável para o acúmulo semanal.

Um exemplo de destinação em lotes (**Figura 4**), onde é necessária a existência de pátios, é o processo adotado pelas UGLs operadas pela Sanepar, no qual o lote de lodo, depois de formado, permanece no mínimo por 60 dias armazenado (30 dias para o período de cura e 30 dias necessários para realização de análises microbiológicas).



Figura 4 – Estocagem de lodo caleado em lotes de (a) grande porte e (b) pequeno porte.

Após o período de estocagem, o lodo pode atingir teores de ST na faixa de 50 a 60% (BITTENCOURT *et al.*, 2014). Este teor de sólidos é comumente encontrado em estocagens prolongadas, acima de 60 dias, para lodos centrifugados com aproximadamente 20% de ST.

Após a mistura do material alcalino, o bio sólido deve, preferencialmente, ficar coberto com lona plástica. Geralmente em UGLs de grande porte não se realiza a cobertura do lodo. Entretanto, destaca-se que a realização desse procedimento tem os seguintes objetivos e vantagens: reter o calor, evitar o umedecimento (chuvas) e diminuir os problemas de emissões de NH_3 . Os

montes deverão ficar cobertos até que ocorra a redução e a estabilização da temperatura. A concentração de sólidos no produto final, apto a ser transportado, dependerá do teor de ST do lodo bruto inicial, da dosagem de cal aplicada e do período de estocagem até o carregamento. Em ETEs de grande porte em que a disponibilidade de pátios é menor e o transporte para as áreas de aplicação é mais frequente, teores acima de 35% ST são comuns.

No **Exemplo 2** seguinte são apresentados os parâmetros de dimensionamento de um pátio de cura por estabilização alcalina prolongada.

Exemplo 2: Parâmetros de dimensionamento de pátio de cura

Trabalho de Cerqueira, Bittencourt e Aisse (2018) procurou sistematizar o dimensionamento de pátios de cura por EAP. A metodologia do trabalho consistiu no levantamento de informações quanto à disposição do lodo nos pátios de cura, por meio de entrevistas semi-estruturadas, realizadas com gestores de UGLs.

A partir das informações obtidas no estudo foi desenhado um "Corte Esquemático" de um monte de lodo (**Figura 5**), para se estimar o volume máximo possível (com base na experiência prática) de se dispor o lodo por unidade de área. Para tanto, algumas premissas foram adotadas:

- O lodo é destinado ao pátio com teores de sólidos acima de 20% e atinge cerca de 50% de ST ao final do período de estocagem.
- Os montes de lodo podem atingir cerca de 3,50 m de altura quando utilizado maquinário.
- Paredes laterais podem ser utilizadas para otimização do uso dos pátios.

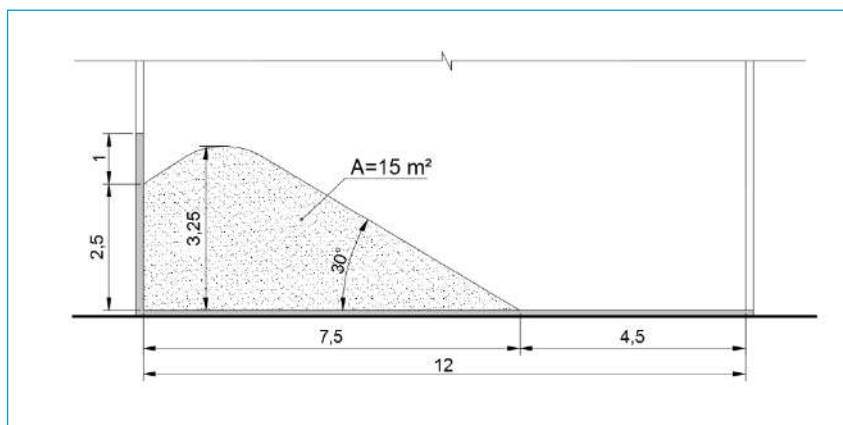


Figura 5 – Corte esquemático de monte de lodo caído.

No corte estão representados os pilares laterais de um pátio industrial teórico, com largura total de 12 m, sendo 4,50 m para deslocamento de pessoal e equipamentos. Desta forma, para cada metro de profundidade do pátio tem-se 15 m³ de lodo e 12 m² de pátio, obtendo-se uma relação de aplicação de lodo por área de pátio de 1,25 m³·m⁻².

Com a relação obtida é possível estimar a taxa de aplicação de sólidos por m² (TS). Para tanto, considerou-se a massa específica do lodo caído (γ) de 850 kg·m⁻³, o teor de umidade de 50% e uma taxa de aplicação de cal de 50% em relação aos ST do lodo.

$$Ts = 1,25 \, \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \times 0,50 \, \text{kgST} \cdot \text{kg}^{-1} \times 850 \, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} = 531 \, \text{kgST} \cdot \text{m}^{-2}$$

Descontando-se a parcela de sólidos adicionados, referentes à incorporação da cal ao lodo, chega-se a 354 kgST·m⁻², o que indica um primeiro parâmetro de dimensionamento dos pátios. Entretanto, segundo Cerqueira, Bittencourt e Aisse (2018), deve-se levar em conta o período em que o lodo permanece em pátio, ou "tempo de estocagem", o qual pode ser composto por quatro etapas: a) período de formação do lote; b) período de higienização e caracterização; c) tramitação da autorização ambiental e d) período adicional devido às dificuldades logísticas.

Os autores mencionam que, devido a diversos fatores, tais como inconsistência de resultados analíticos, ocorrência de chuvas e sazonalidade das culturas, na prática é recomendável a consideração de 1 ano como tempo de estocagem, para o caso específico da EAP.

Desta forma, sugere-se a taxa de aplicação de sólidos de 350

kgST·m⁻²·ano⁻¹. Os autores verificaram taxas anuais de sólidos praticadas em três UGLs do estado do Paraná, dando maior sensibilidade ao resultado teórico obtido. Os resultados foram de 362 kgST·m⁻²·ano⁻¹, 250 kgST·m⁻²·ano⁻¹ e 173,7 kgST·m⁻²·ano⁻¹, respectivamente, para as ETEs Tibagi, ETE Ronda e ETE CIC Xisto, mostrando que a taxa calculada se apresentou dentro da faixa efetivamente praticada, porém, mais próxima do limite superior.

Por fim, os autores ainda formalizam o método de dimensionamento dos pátios para EAP, estabelecendo uma analogia com a fórmula convencional de dimensionamento de leitos de secagem:

$$A = \frac{P_{\text{lodo}} \times T_c}{T_x}$$

Na qual: A - Área necessária de pátio (m²); P_{lodo} - Produção de lodo referente à todas as ETEs contribuintes à UGL (kgST·d⁻¹); T_c - Tempo de ciclo, recomendado de 1 ano (dias); T_x - Taxa de aplicação de sólidos, recomendada de até 350 kgST·m⁻²·ano⁻¹.

Na **Tabela 3** são apresentados os principais problemas que podem ocorrer durante a operação do processo de estabilização alcalina em ETEs ou UGLs, suas possíveis causas e soluções.

4. ASPECTOS ECONÔMICOS

A consideração dos aspectos econômicos referentes ao processo de EA é de extrema importância para a implementação e o planejamento de ETEs que adotam esse tipo de tratamento.

Tabela 3 – Possíveis problemas encontrados durante o processo de EA, causas e soluções.

Problema	Causas	Soluções
Cal virgem perdendo sua capacidade de reação térmica/elevação do pH.	- Absorção da umidade do ar na estocagem, transporte ou transferência. - Impurezas, granulometria, concentração de óxidos baixa. - Dosagem inadequada.	- Manter silo/local de estocagem fechado, com cuidados durante o transporte e transferência. - Exigência de padrão de qualidade físico-química e avaliação da qualidade na recepção do material. - Mudança de material alcalino. - Verificação de dosagem.
Misturador do higienizador travando.	- Alimentação de lodo e/ou cal está excessiva. - Embuchamento dos eixos com fibras e resíduos.	- Regular a dosagem. - Paralisar alimentação de lodo e cal e manter o equipamento ligado. - Esvaziar o equipamento e remover detritos.
Empedramento da cal no silo de estocagem/roscas e dosadores de cal.	- Período de estocagem prolongado. - Silo não está bem vedado (entrada de ar úmido). - Conexões entre misturadores, dosador de cal, roscas e silo lacradas. - Sem saídas para vapor de água. - Sistema de fragmentação/ descompactação inoperante. - Ar de sistema de fragmentação /descompactação com umidade.	- Fragmentação manual da cal na saída do silo com martelo de borracha. - Limpeza do silo / roscas. - Verificação da operacionalidade dos equipamentos.
Redução de capacidade de roscas transportadoras e equipamento de mistura.	Desgaste dos eixos helicoidais (usualmente observado após 2 a 5 anos de operação).	Substituição de peças.
Lodo não atinge a temperatura/pH desejada para higienização.	- Umidade do lodo pode estar fora da faixa ótima. - Cal virgem pouca reativa. - A mistura não está adequada. - Dosagem de cal insuficiente.	- Ajustar a umidade do lodo. - Verificar a capacidade de reação térmica da cal. - Verificar o misturador do higienizador. - Ajustar dosagem de cal.
Lodo mantém odor depois de higienizado.	- Dosagem de cal baixa. - Período longo de estocagem com retorno de pH para faixa de atividade biológica intensa. - Uso de coagulantes orgânicos em processos físico-químicos de tratamento de esgoto ou adensamento de lodo.	- Verificar o controlador de pH e ajustar a dosagem. - Calear novamente o lodo. - Mudar coagulante de lodo.
Combustão do lodo misturado com a cal (Figura 6a).	- Dosagem elevada de cal. - Umedecimento localizado (goteiras ou molhamento) do lodo com altos teores de ST e cal.	- Ajustar dosagem. - Abafamento do fogo com extintor. Jamais aplicar água em lodo em combustão.
Emissão elevada de NH ₃ .	- Lodos com altos teores de N na forma NH₃. - Lodos úmidos (desaguamento mecanizado).	Realização da mistura em local confinado.
Irritação de olhos e mucosas na operação de mistura.	Liberção de pó em roscas/coifas/pontos de amostragem/ misturador (Figura 6b).	Uso de equipamentos de proteção individual (EPIs): máscaras, luvas, botas e uniforme adequados.
Resultados analíticos de sanitização não atendem aos requisitos mínimos exigidos	- Dosagem de cal inadequada. - Mistura inadequada. - Reagente alcalino com baixa reatividade.	- Proceder ao processo de EA novamente. - Destinar o lote para aterro sanitário.

Fonte: Adaptado de Andreoli *et al.* (2001).

Tomaz (2020) realizou uma análise de custos para 45 glebas agrícolas distribuídas em cinco municípios da Região Metropolitana de Curitiba (RMC) durante o ano de 2019. Ao todo, foram destinadas mais de 8.500 toneladas de biossólido, aplicadas em uma área de 423,5 hectares. O processo de higienização empregado foi o de EAP, com utilização de cal virgem (54% de CaO) a uma relação de mistura de 30% CaO com o teor de ST presente no lodo. Os resultados obtidos da análise evidenciaram um custo total (Capex e Opex do processo de higienização e destinação agrícola) de R\$ 611,33·t⁻¹ de ST. Considerando a massa total de lodo, o custo da tonelada para destinação nas glebas agrícolas foi de R\$ 115,00·t⁻¹. Para fins de comparação, o valor de destinação da tonelada de lodo em aterro sanitário cobrado, para o ano de 2019, foi, em média, igual a R\$ 155,00·t⁻¹ (US\$ variou, em 2019, de R\$ 3,80 a 4,00).

Cerqueira (2019) realizou avaliação semelhante, no entanto, com diferentes métodos de desaguamento - leito de secagem, centrífuga e misto (leito de secagem e centrífuga), seguidos de higienização do lodo por EAP, para uma ETE com capacidade de tratamento de 160 L·s⁻¹. Considerando o custo total (Capex e Opex), foram verificados valores entre R\$ 122,25 e 160,75·t⁻¹ ST, condicionado aos métodos de desaguamento utilizado².

Adicionalmente, Cerqueira (2019) realizou estudos de custos para diferentes vazões de tratamento de esgoto. O autor verificou, desse modo, que as centrífugas se tornam mais econômicas que os leitos de secagem somente

a partir da vazão de tratamento de esgoto de 130 L·s⁻¹, isso devido aos custos de aquisição dos equipamentos de mistura de cal. Por outro lado, inserindo-se os custos operacionais, os leitos mantiveram-se mais econômicos para ETEs de até 160 L·s⁻¹. Cerqueira (2019) ainda comparou a EAP com o processo de secagem térmica de lodo utilizando como combustível o biogás produzido em reatores UASB. O autor constatou que a EAP se apresentou mais econômica que a secagem térmica em todas as faixas de vazão estudadas (80 a 750 L·s⁻¹), considerando, para tanto, os custos de implantação somados aos de operação (sem considerar os custos com a destinação do biossólido). Considerando apenas os custos de implantação, o processo de secagem térmica mostrou ser mais econômico a partir da vazão de 500 L·s⁻¹.

Além de contribuir com a sustentabilidade da ETE, o uso agrícola de lodo higienizado por meio da EA promove a redução dos custos dos produtores rurais, uma vez que dispensa gastos com fertilizantes químicos e corretivos de solo, em especial o calcário. Por outro lado, promovem o aumento da produtividade das culturas, com impacto nas receitas financeiras. Segundo Bittencourt *et al.* (2009), no ano de 2007, as ETEs da Região Metropolitana de Curitiba operadas pela Sanepar destinaram para a agricultura 8.903 toneladas de biossólido, os quais foram aplicados em uma área de 295 ha, gerando aos agricultores que o receberam uma economia média de R\$ 467,90 por ha.



Figura 6 – Problemas encontrados durante o processo de EA: (a) combustão do lodo misturado com a cal e (b) elevada liberação de poeiras.

² leito de secagem + EAP: R\$ 148,47; centrífuga + EAP: R\$122,25; leito de secagem e centrífuga + EAP: R\$ 160,75.

Com base nos dados básicos de correção pelo Índice Geral de Preços – Mercado (IGP-M) divulgado mensalmente pela Fundação Getúlio Vargas (FGV), este valor corresponde à aproximadamente R\$ 1.034,82 por ha para o mês de junho de 2020.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora a prática do uso de biossólido para fins agrícolas seja uma importante tendência no setor de saneamento brasileiro, destaca-se que há problemas de cunho técnico, de aspectos construtivos e de rotinas operacionais que precisam ser mitigados para impulsionar o aproveitamento do lodo produzido em ETEs. A adoção de técnicas e boas práticas de engenharia reportadas nesta NT, as quais foram baseadas em estudos de literatura e experiências dos autores, convergem para o incremento do número de ETEs aptas a realizarem o processo de EA. Dentre os principais pontos de aprimoramento elencados destacam-se: (i) o adequado sistema de armazenamento de material alcalino, sendo este escolhido pelo porte da ETE; (ii) a adequada dosagem de cal ao lodo, bem como

os métodos de mistura e o tempo de contato mínimo para higienizar de forma satisfatória o lodo de esgoto; (iii) o dimensionamento de pátios de maturação/cura de lodo; e (iv) estudos de aspectos econômicos inerentes ao processo de EA. As experiências de sucesso conquistadas nos últimos anos foram fundamentais para a elaboração da nova resolução de uso agrícola de biossólido, sendo que esta nota técnica poderá fomentar a adoção de melhorias ainda incipientes no Brasil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis.

Este trabalho faz parte da série de publicações do INCT ETEs Sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ANDREOLI, C. V.; von SPERLING, M.; FERNANDES, F. *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 484 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuais, v. 6)

BITTENCOURT, S.; MATOS, A. T.; SILVA, B. S.; OLIVEIRA, F. C.; CHAMHUM-SILVA, L. A.; MIKI, M. K.; BICO, A. K. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo – Nota Técnica 6 - Uso agrícola de biossólido. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 75-87, 2022a.

BITTENCOURT, S.; MATOS, A. T.; SILVA, B. S.; MIKI, M. K.; BASTOS, R. K. X. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo – Nota Técnica 2 - Aspectos legais. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 17-29, 2022b.

BITTENCOURT, S.; SERRAT, B. M.; AISSE, M. M.; GOMES, D. Sewage sludge usage in agriculture: a case study of its destination in the Curitiba Metropolitan Region, Paraná, Brazil. *Water, Air & Soil Pollution*, v. 225, n. 9, p. 2074, 2014.

BITTENCOURT, S.; ANDREOLI, C. V.; MOCHIDA, G. A.; SOUZA, L. M. K. M. Uso agrícola de lodo de esgoto, estudo de caso da Região Metropolitana de Curitiba. *Revista AIDIS*, v. 2, n. 1, p. 1-11, 2009.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Brasília, DF, 2020.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Brasília, DF, 2006.

CERQUEIRA, P. L. W. *Custos de desaguamento e higienização de lodo em ETEs com reatores UASB seguidos de pós-tratamento aeróbio: subsídios para estudos de concepção*. 2019. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

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. In: *30º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2019, Natal, Brasil. *Proceedings*. Natal, Brasil: ABES, 2019.

GODINHO, V. M. *Estudo sobre a ocorrência de ovos de helmintos e viabilidade de Ascaris sp. em lodos anaeróbios in natura e submetidos à higienização por caleação e por tratamento térmico*. 2003. 139 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

MATOS, A. T.; BORTOLINI, R. L. R.; MORAES, B. A. B. de.; LEITE, W. R. M.; KATO, M. T. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo - Nota Técnica 3 - Higienização de lodo via compostagem. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 31-44, 2022.

METCALF & EDDY. *Tratamento de efluentes e recuperação de recursos*. Tradução: Hespanhol, I.; Mierzwa, J. C. 5ª ed., Porto Alegre, Brasil: AMGH, 2016. 2008 p.

PEGORINI, E. S.; HARTMANN, C. M.; ANDREOLI, C. V. Avaliação do processo de higienização do lodo de esgoto em estufas plásticas instaladas em ETEs da SANEPAR. In: *24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2007, Belo Horizonte, Brasil. ABES, 2007.

PEGORINI, E. S.; HOPPEN, C.; TAMANINI, C. R.; ANDRADE, F. L.; TORREZAN, H. T. Aperfeiçoamento do processo de higienização através da caleação: II Potencial de Alcalinização Prolongada. In: *VIII Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental-SIBESA*, 2006, Fortaleza, Brasil. ABES 2006a.

PEGORINI, E. S.; TAMANINI, C. R.; HOPPEN, C.; LEITE, B. Z.; WEIGERT, G. Aperfeiçoamento do processo de higienização através da caleação: I Potencial de Pasteurização. In: *VIII Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental-SIBESA*, 2006, Fortaleza, Brasil. ABES 2006b.

POMPEO, R. P.; ANDREOLI, C. V.; DE CASTRO, E. A.; AISSE, M. M. 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.1-14, 2016.

POSSETTI, G. R. C.; JASINSKI, V. P.; ANDREOLI, C. V.; BITTENCOURT, S.; CARNEIRO, C. Sistema térmico de higienização de lodo de esgoto movido a biogás para ETEs de médio e pequeno porte. In: *Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2012, Belo Horizonte, Brasil. ABES, 2012.

RIETOW, J. C.; POSSETTI, G. R. C.; LOBATO, L. C. S.; ANDREOLI, C. V.; CARNEIRO, C.; BICO, A. K.; WAGNER, L. G.; AISSE, M. M. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo - Nota Técnica 5 - Secagem e higienização térmica de lodo em diferentes portes de ETEs. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 59-74, 2022.

SAMPAIO, A. O. Adequação das estações de tratamento de esgotos sanitários à resolução número 375 do CONAMA. In: *Coscione, A. R.; Nogueira, T. A. R.; Pires, A. M. M. Uso agrícola de lodo de esgoto*. Botucatu, Brasil: FEPAF, 2010. p. 256-280.

TOMAZ, S. M. H. *Avaliação de custos de disposição final de lodo de esgoto na agricultura em Curitiba e região metropolitana*. 2020. 22 p. Trabalho de Conclusão (Especialização em Saneamento Ambiental). Universidade Estadual do Norte do Paraná, Jacarezinho, 2020.

US EPA. United States Environmental Protection Agency. *Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge*, EPA 815-R-06e002, revised edition: USEPA, 2003.

Parte A: Higienização e uso de lodo de esgoto no solo

Nota Técnica 5 – Secagem e higienização térmica do lodo

Part A: Sanitization and use of sewage sludge in soil
Technical Note 5 - Thermal sludge drying and sanitization

**Julio Cezar Rietow¹, Gustavo Rafael Collere Possetti^{2*}, Livia Cristina Silva Lobato³,
Cleverson Vitorio Andreoli⁴, Charles Carneiro⁵, Alexandre Klaus Bico⁶,
Luiz Gustavo Wagner⁷, Miguel Mansur Aisse⁸**

RESUMO

A secagem térmica do lodo produzido em estações de tratamento de esgoto (ETEs) é um processo físico que possibilita a redução significativa da umidade intrínseca ao material, reduzindo sua massa e volume para manejo e disposição final. O processo ainda possibilita a higienização do lodo por via térmica, dispensando o uso de produtos químicos para tal. Um requisito fundamental para a operacionalização do processo é a disponibilidade de calor, o qual pode ser obtido, por exemplo, por meio da recuperação energética do biogás e do próprio lodo seco encontrados nas ETEs, corroborando com os conceitos de sustentabilidade, energias renováveis e economia circular. Embora a secagem térmica do lodo já se encontre consolidada em vários países, ainda não é uma prática comum no Brasil. Nesse contexto, esta nota técnica apresenta os principais tópicos de interesse associados com a secagem e higienização térmica do lodo para ETEs de diferentes portes, bem como uma revisão dos fundamentos inerentes ao processo e dos métodos de seleção de secadores. Reportam-se neste documento, ainda, exemplos de sistemas de secagem e higienização térmica do lodo, além de aspectos importantes a serem considerados na implementação do processo em ETEs.

Palavras-chave: biogás; higienização térmica; lodo de esgoto; secagem térmica.

ABSTRACT

Thermal drying of the sludge produced in sewage treatment plants (STPs) is a physical process that allows for a significant reduction of the moisture intrinsic to the material, reducing its mass and volume for handling and final disposal. The process also allows for thermal sanitization of the sludge, dispensing the use of chemical products for that purpose. A fundamental requirement for the operationalization of the process is the availability of heat, which can be obtained, for example, through the energy recovery of biogas and the dry sludge found in STPs, corroborating with the concepts of sustainability, renewable energy and circular economy. Although thermal sludge drying is already consolidated in several countries, it is still not a common practice in Brazil. Therefore, this technical note presents the main topics of interest associated with drying and thermal sanitation of sludge for STPs of different sizes, as well as a review of the fundamentals inherent to the process and the methods for selection of dryers. This document also reports examples of thermal sludge drying and sanitization systems, in addition to important aspects to be considered when implementing the process in STPs.

Keywords: biogas; thermal sanitation; sewage sludge; thermal drying.

¹Engenheiro Ambiental e de Segurança do Trabalho pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). Mestre e doutorando em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

²Engenheiro Ambiental pela UFPR e Engenheiro Eletricista pela Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Mestre e Doutor em Ciências pela UTFPR. Profissional da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). Professor do Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade do Instituto Superior de Administração e Economia do Mercosul (ISAE). Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

³Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

⁴Engenheiro Agrônomo, Mestre em Ciências do Solo e Doutor em Meio Ambiente e Desenvolvimento pela UFPR. Professor do Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade do ISAE. Diretor da Consultoria e Engenharia Ambiental (CEA).

⁵Engenheiro Agrônomo, Mestre em Ciências do Solo e Doutor em Geoquímica de águas pela UFPR. Pós-doutorado em Engenharia e Ciência da Água pela UNESCO-IHE (Holanda). Professor do Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade do ISAE.

⁶Agrônomo pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR).

⁷Tecnólogo em Construção Civil e Especialista em Energias Renováveis pela UTFPR. Profissional da Sanepar.

⁸Engenheiro Civil pela UFPR. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos. Doutor em Engenharia Hidráulica pela Universidade de São Paulo (USP). Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da UFPR.

(*) Endereço para correspondência: Avenida Visconde de Guarapuava, 2943 – Instituto Superior de Administração e Economia do Mercosul (ISAE) – Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade. Curitiba, PR. CEP: 80010-100. e-mail: gustavo_possetti@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

Os elevados custos relacionados ao gerenciamento do lodo têm feito com que os prestadores de serviços de esgotamento sanitário busquem por novas tecnologias de secagem e de higienização desse material com vista ao seu uso benéfico no solo. Dentre as possibilidades existentes destacam-se os sistemas de secagem térmica de lodo. Nesses sistemas ocorre o aquecimento da massa de lodo, permitindo significativas taxas de remoção de água e, ainda, possibilitando a higienização do material, sem a necessidade, portanto, da incorporação de produtos químicos (p. ex.: cal – ANDREOLI *et al.*, 2001). A demanda de energia necessária para o processo de secagem térmica do lodo pode ser suprida de diferentes formas dentro de uma estação de tratamento de esgoto (ETE) com produção de biogás, sendo elas: diretamente pela transformação térmica do biogás, pelo aproveitamento dos gases quentes do processo de cogeração de energia a partir do aproveitamento do biogás e pelos gases quentes oriundos da combustão do lodo seco (ARLABOSSE *et al.*, 2012; LOBATO *et al.*, 2012).

Embora os benefícios do processo de secagem e higienização térmica do lodo sejam amplamente reconhecidos, destaca-se que o número de ETEs que utilizam tais sistemas é ainda pouco expressivo no Brasil. Secadores térmicos para ETEs de médio e grande porte podem ser encontrados em algumas plantas nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais e Paraná. Entretanto, na maioria dessas estações, por empregarem gás natural como fonte energética, os equipamentos de secagem encontram-se inoperantes devido aos elevados custos de operação do sistema. Uma das poucas experiências nacionais que empregam o biogás, produzido em reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB, do inglês *upflow anaerobic sludge blanket*), no processo de secagem térmica do lodo é a ETE Vieira (Montes Claros), em Minas Gerais. Além das questões intrínsecas aos custos, a dificuldade de licenciamento ambiental, a falta de informações sobre a segurança operacional e de demanda energética, bem como as incertezas quanto a possíveis emissões atmosféricas, são outros fatores que acabam limitando o emprego do processo de secagem térmica (POSSETTI *et al.*, 2019).

Devido aos elevados custos de aquisição e operação, os secadores térmicos de lodo disponíveis no mercado não

apresentam viabilidade econômica e financeira para serem implantados em ETEs de pequeno porte (VALENTE, 2015; CERQUEIRA, 2019). Desse modo, sistemas simplificados de secagem e higienização térmica a partir do aproveitamento do biogás estão sendo reportados na literatura como uma alternativa capaz de promover o tratamento do lodo de esgoto em ETEs de pequeno porte (RIETOW *et al.*, 2018). Apesar de alguns estudos em escala piloto indicarem exequibilidade, principalmente quando suplementado com energia solar, tais alternativas ainda apresentam certas dúvidas quanto à eficiência na remoção de microrganismos patogênicos (WAGNER *et al.*, 2015).

Com o intuito de diminuir as incertezas técnicas e possibilitar a criação de parâmetros de projetos aplicáveis, a presente nota técnica (NT) tem por objetivo apresentar os principais tópicos de interesse no que tange ao emprego de sistemas de secagem e higienização térmica do lodo, em diferentes portes de ETEs. Isto posto, neste documento é aprofundada a discussão apontada na NT 2 desta coletânea (BARROS *et al.*, 2022), discorrendo sobre os seguintes aspectos: (i) fundamentos do processo; (ii) método de seleção de secadores; e (iii) experiências de secagem e higienização térmica em diferentes portes de ETEs.

2. FUNDAMENTOS DO PROCESSO

2.1. Forças de ligação da água presente no lodo

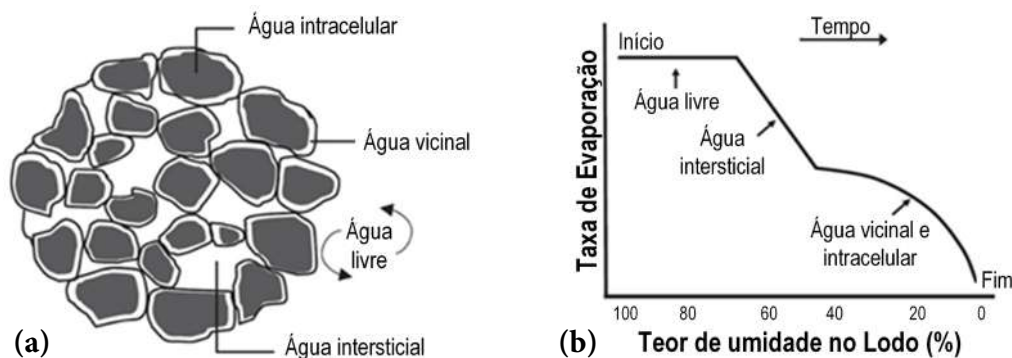
A água presente no lodo possui diferentes forças de ligações intermoleculares com a parte sólida do material. Essas forças fazem com que a água se encontre mais ou menos aderida a esses sólidos. Dessa forma, diferentes técnicas de remoção de umidade podem ser utilizadas para a redução do volume de lodo a ser gerenciado em uma ETE. As principais categorias de ligações intermoleculares entre a água e os sólidos presentes no lodo são: água livre, água intersticial, água vicinal e água intracelular (**Figura 1a**). A água livre é aquela que não está associada às partículas de sólidos e pode ser facilmente separada por gravidade. A água intersticial, por sua vez, se caracteriza por estar presa nos interstícios dos flocos, possuindo baixa energia de ligação entre as partículas sólidas e líquidas. Pode ser removida facilmente por força mecânica e/ou pelo uso de floculantes. Isto posto, tanto a água livre quanto a água

intersticial podem ser removidas por processos de desagregamento naturais (p. ex.: leitos de secagem) ou mecanizados (p. ex.: centrífugas e filtros prensa). A água vicinal é aquela presa à superfície das partículas por adsorção e adesão. É composta por várias camadas de moléculas de água presas firmemente à superfície da partícula por ligações de hidrogênio, e sua remoção só pode ser alcançada por meio da aplicação de calor. Por fim, a água intracelular se caracteriza por estar ligada quimicamente às partículas de sólido, e assim como a água vicinal, só pode ser removida por forças térmicas que promovam uma mudança no estado de agregação da água (CHEN *et al.*, 2015). Na **Figura 1b** é apresentado um exemplo de curva de secagem típica de lodo de esgoto úmido. Ao contrário das curvas de secagem comuns de outros materiais, que consistem em apenas um período de taxa de queda, a secagem do lodo de esgoto apresenta dois períodos distintos de taxa decrescente de evaporação, além de um período de taxa de secagem constante (HASSAN *et al.*, 2017). A partir dessas constatações, destaca-se que concentrações de sólidos superiores a 40% no lodo podem ser alcançadas por meio do uso da secagem térmica.

2.2. Secagem por via térmica

O processo de secagem térmica pode ser entendido como a evaporação da água presente no lodo, por meio de seu aquecimento em ambiente controlado, propiciando a redução da umidade presente no material. A evaporação da água ocorre devido à existência de diferentes gradientes de umidade e de temperatura, entre o meio do qual a umidade é removida e o meio para o qual é transferida (DAVID, 2002).

Segundo Mujumdar (2015), como condição geral para a secagem térmica, dois processos fundamentais devem ocorrer simultaneamente: (i) transferência de calor para evaporação do líquido; e (ii) transferência de massa como líquido ou vapor dentro dos sólidos e como vapor pela superfície. De acordo com o processo de transferência de calor entre ar quente e lodo, os processos de secagem térmica podem ser classificados em diretos, indiretos e mistos. Nos processos de secagem direta, a transferência de calor é realizada pelo processo de convecção, conforme apresentado na **Figura 2a**, sendo o lodo aquecido em contato direto com o ar quente, propiciando assim uma maior taxa de transferência de calor para o material. Já nos processos de secagem indireta, a transferência de calor ocorre por condução, conforme apresentado na **Figura 2b**, sendo o lodo aquecido por meio do contato com uma superfície aquecida que o separa do meio de secagem (água quente, vapor, óleo térmico, ar quente). A elevação da taxa de transferência de calor, em um processo indireto de secagem, pode se dar por: aumento da área da superfície de contato, escolha de um material com alta condutividade térmica e diminuição da espessura da parede. Por sua vez, nos processos denominados mistos, a transferência de calor é efetuada por uma combinação entre as duas formas citadas anteriormente. Informações mais detalhadas dos fundamentos do processo de secagem térmica de lodo de esgoto podem ser acessadas nos estudos conduzidos por David (2002), Bennamoun *et al.* (2013) e Mujumdar (2015).



Fonte: Adaptado de Hassan *et al.* (2017).

Figura 1 – (a) Forças de ligação da água presente no lodo; (b) Curva típica de secagem de lodo.

A diminuição do teor de umidade no lodo faz com que as suas propriedades físico-químicas se alterem durante o processo de secagem. Uma das mudanças mais importantes é a transição da zona úmida para a zona pegajosa e, posteriormente, para a zona granular (**Figura 3**). A zona pegajosa, também conhecida por *glue phase*, é aquela onde o lodo tem sua viscosidade aumentada devido à formação de biopolímeros de cadeia longa. Com a redução do teor de umidade no meio, os biopolímeros tornam-se cada vez mais concentrados no lodo, resultando na formação de uma mistura pegajosa que pode ficar encrostada e/ou “colada” na superfície do equipamento de secagem térmica. Dependendo da quantidade de material depositado, há uma variação na hidrodinâmica e na taxa de transferência de calor durante o processo de secagem, interferindo, conseqüentemente, no desempenho do secador (KUDRA, 2003; BENNAMOUN *et al.*, 2013).

No que diz respeito a eficiência energética do processo de secagem térmica, em condições ideais são necessários 2.744 kJ (ou 0,76 kWh) de energia para evaporar 1 kg de água presente no lodo. Entretanto, em condições operacionais normais, este valor pode ser acrescido em até 100% (ANDREOLI *et al.*, 2001). A demanda total de energia dependerá do tipo de lodo processado e do tipo, características e eficiência do equipamento escolhido. Destaca-se que o consumo de combustível é o principal componente do custo operacional dos sistemas de secagem térmica, sendo que a utilização de fontes alternativas de combustível, como o biogás oriundo de reatores UASB ou de biodigestores anaeróbios, pode promover uma considerável redução nos gastos de operação.

2.3. Higienização por via térmica

Conforme já destacado em outras NTs da presente coletânea, o lodo contém nutrientes, como nitrogênio e fósforo, essenciais para a nutrição de plantas, além de ser rico em matéria orgânica, o que traz melhorias às características físicas, químicas e biológicas do solo, tornando-o um excelente adubo e condicionador desse meio. Contudo, o lodo também é caracterizado por possuir microrganismos patogênicos, que podem acabar por restringir seu emprego em áreas agrícolas.

Dentro desse contexto, o tratamento térmico é uma das alternativas de higienização do lodo capaz de inativar e/ou eliminar os microrganismos patogênicos presentes no lodo. Isto se deve pelas enzimas desses microrganismos sofrerem modificação em suas estruturas devido ao efeito térmico ao longo do tempo de contato. Assim, nos processos envolvendo a higienização do lodo por via térmica, as variáveis de controle são: tempo de contato e temperatura.

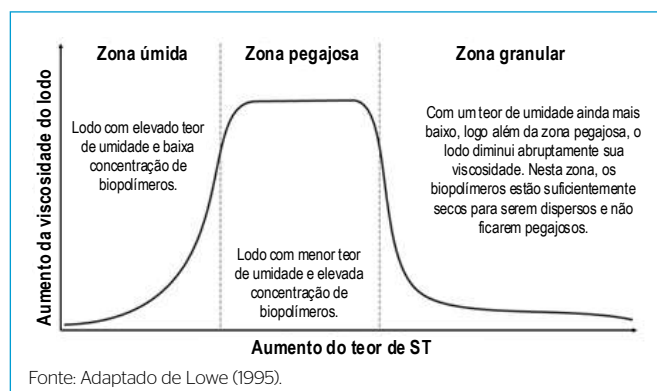


Figura 3 – Zonas de consistência do lodo durante o processo de secagem térmica.

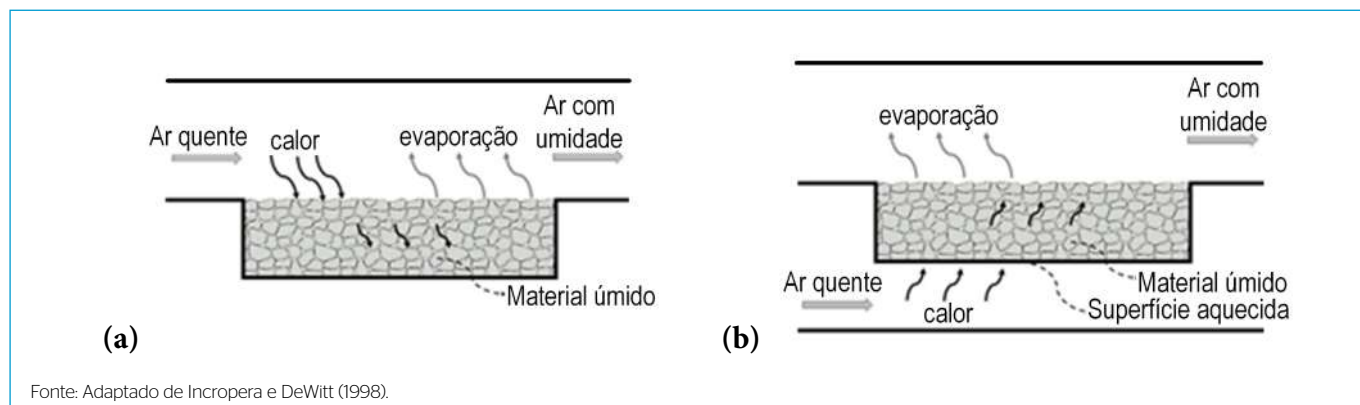


Figura 2 – Exemplo esquemático de transferência de calor: (a) processo de secagem direta - convecção; (b) processo de secagem indireta - condução.

A Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 498/2020 (BRASIL, 2020), que revogou e substituiu a Resolução CONAMA nº 375/2006, destaca o parâmetro microbiológico *Escherichia coli* como critério de higienização e classificação do biossólido para uso em solo. Conforme já abordado na NT 2 desta coletânea (BITTENCOURT *et al.*, 2022), o biossólido a ser destinado para uso em solos deverá ser classificado em Classe A ou Classe B. Para a Classe A, o biossólido deverá atender ao

limite máximo de 10^3 *Escherichia coli* por grama de sólidos totais (g^{-1} de ST) e ser proveniente de um dos processos de higienização por via térmica descritos na Tabela 1. Já para um biossólido Classe B, ele deverá atender ao limite máximo de 10^6 *Escherichia coli*- g^{-1} de ST.

O Exemplo 1 ilustra o cálculo referente a determinação do tempo de contato mínimo a ser empregado em um processo de higienização para obtenção de um biossólido Classe A.

Tabela 1 – Regime de tempo-temperatura para enquadramento do biossólido Classe A

Processo	Requisitos			
	Regime	Aplicação	Temperatura e tempo de contato mínimos	Relação Tempo x Temperatura
Alternativa 1*	A	Lodo: $\geq 7\%$ ST	Temperatura do lodo ≤ 50 °C. Tempo mínimo de contato: 20 min.	$D = \frac{131.700.000}{10^{0,14 \times t}}$
	B	Lodo: $\geq 7\%$ ST na forma de pequenas partículas, aquecido por meio do contato entre gases ou líquidos imiscíveis	Temperatura do lodo ≥ 50 °C. Tempo mínimo de contato: 15s.	
	C	Lodo: $< 7\%$ ST	Aquecido de, no mínimo, 15 s até 30 min	
	D	Lodo: $< 7\%$ ST	Temperatura do lodo ≥ 50 °C. Tempo mínimo de contato: 30 min.	$D = \frac{50.070.000}{10^{0,14 \times t}}$
Alternativa 3	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.			
Alternativa 5	Atendimento dos requisitos de <i>Escherichia coli</i> de Classe A e atendimento dos seguintes critérios, de acordo com cada processo de redução adicional de patógenos: a) secagem térmica direta ou indireta para reduzir o teor de água no lodo de esgoto a 10% ou menos, devendo a temperatura das partículas de lodo superar 80°C ou a temperatura de bulbo úmido de gás, em contato com o lodo de esgoto, no momento da descarga do secador, ser superior a 80°C; b) tratamento térmico pelo aquecimento do lodo de esgoto sanitário, na forma líquida, a 180°C, no mínimo, durante um período de 30 minutos; c) processos de pasteurização, pela manutenção do lodo de esgoto a uma temperatura mínima de 70°C, por um período de pelo menos 30 minutos.			

Nota: *Lodo tratado por um dos quatro regimes (A, B, C e D apresentados ao lado) de tempo (D em dias) e temperatura (t em °C). O período de tempo associado a um determinado valor de temperatura deve ser definido por meio das equações de relação tempo x temperatura, devendo-se respeitar os requisitos mínimos de tempo e temperatura para cada regime especificado.

Fonte: Adaptado de Brasil (2020).

Exemplo 1: Determinar o tempo mínimo de contato, dentro de um sistema simplificado de secagem e higienização térmica, que um lodo desaguado, com teor de ST de 20%, deverá possuir para obtenção de um biossólido Classe A. Para fins de cálculo, o sistema simplificado é alimentado com o biogás produzido em reatores UASB, sendo esse insumo capaz de proporcionar uma temperatura constante na massa de lodo igual a 60 °C (t).

Solução

a) Determinação da alternativa e regime do processo de higienização:

Será empregada a Alternativa 1 (Regime A) para cálculo do tempo de contato mínimo

b) Cálculo do tempo de contato mínimo (D):

$$D = \frac{131.700.000}{10^{0,14 \times t}} = \frac{131.700.000}{10^{0,14 \times 60}} = 0,5 \text{ dias ou 12 horas}$$

Desse modo, para obtenção de um biossólido Classe A, o lodo desaguado em questão deverá permanecer a 60 °C por um período mínimo de 12 horas. Tais valores respeitam os requisitos estabelecidos pela Alternativa 1 (Regime A) de temperatura mínima de 50 °C e tempo de contato mínimo de 20 minutos.

3. SECAGEM E HIGIENIZAÇÃO TÉRMICA DO LODO EM ETES DE GRANDE PORTE

A implementação de secadores térmicos de lodo comerciais e a possibilidade de recuperação de energia térmica de motores de combustão interna, alimentados com biogás, devem ser considerados para ETES de grande porte (População equivalente > 100.000 hab.). Diversos tipos de secadores térmicos para ETES de grande porte estão atualmente disponíveis no mercado, sendo os principais deles (PERRY e GREEN, 1997; ARLABOSSE *et al.*, 2012; MUJUMDAR, 2015):

- Secadores rotativos, do tipo direto e/ou indireto: apresentam um ou mais cilindros rotativos, onde o lodo é deslocado de maneira contínua ao longo de sua geratriz inferior, e possuem uma demanda energética de 0,9 a 1,1 kWh·kg⁻¹ água evaporada.
- Secadores transportadores de esteira (*belt dryer*): possuem processo contínuo de secagem com circulação permanente de ar. O lodo, ao entrar no secador, é imediatamente fragmentado por meio de um extrusor, sendo, então, distribuído em uma fina camada sobre a superfície da esteira transportadora. Estes secadores possuem uma demanda de energia de 0,7 a 1,1 kWh·kg⁻¹ água evaporada.
- Secadores *flash dryer*: são responsáveis por desagregar as partículas do lodo por meio de um jato de ar quente, podendo gerar uma grande quantidade de finos e poeiras, e a faixa de demanda energética para os secadores do tipo *flash dryer* é de 1,2 a 1,4 kWh·kg⁻¹ água evaporada.
- Secadores do tipo *paddle dryer*: são caracterizados pelo contato indireto do lodo com o meio de aquecimento, o qual passa por dentro do rotor, de modo que toda a superfície das pás e demais eixos atuem como uma superfície de transferência de calor. A demanda energética desse tipo de secador se encontra na faixa de 0,8 a 0,9 kWh·kg⁻¹ água evaporada.

As principais vantagens associadas ao processo de secagem direta do lodo são: fácil manipulação do material, elevado teor de ST no lodo seco e um menor tempo de detenção do lodo no secador se comparado com o processo de secagem indireta. Por outro lado, por haver contato direto do lodo com o ar quente, pode ocorrer a formação de compostos odorantes e particulados durante o processo de secagem

direta. Entre as vantagens do processo de secagem do tipo indireta, destaca-se que o vapor e os maus odores são mais facilmente controlados, e há um menor risco de incêndio e explosão, devido ao não atingimento da temperatura de autoignição do lodo. Contudo, denota-se que a secagem indireta demanda um maior tempo de detenção do lodo dentro do secador para atingimento de uma temperatura adequada de higienização do material.

Conforme destacado, existe uma variedade de secadores térmicos disponíveis no mercado, resultando em uma dificuldade na escolha para aquisição do equipamento. Devido à utilização consolidada desses equipamentos em outras atividades, como a de secagem de grãos e de alimentos, desenvolveram-se ao longo do tempo métodos para a seleção de secadores para esses setores. Já para os serviços de saneamento, em função do tratamento e disposição final do lodo ser uma temática recente, ainda não há um método difundido para a seleção desses equipamentos que leve em consideração as particularidades do setor, assim como do material a ser processado. Com base nos critérios indicados por Strumillo e Kudra (1986), Kemp e Bahu (1995) e Herndon (2008) que podem auxiliar na seleção de secadores de lodo para ETES, Prata *et al.* (2017) desenvolveram um método simplificado para escolha de secadores térmicos de lodo (Figura 4).

A primeira etapa do método proposto por Prata *et al.* (2017) se refere à classificação do regime de operação (batelada ou contínuo), em função da taxa de produção de lodo que a ETE apresenta. A partir da definição do regime de operação, inicia-se a segunda etapa, que consiste em uma pré-seleção dos secadores disponíveis. A terceira etapa realiza a interação dos dados levantados da ETE e dos dados do equipamento, no intuito de verificar quais dos equipamentos são mais adequados à situação da ETE, a partir dos critérios estabelecidos. A última etapa do método proposto serve de instrumento final para a tomada de decisão sobre os equipamentos levantados, baseando-se nos custos envolvidos e apresentando uma estimativa do tempo de retorno dos investimentos aplicados. Para tanto, deve ser realizada uma análise econômica simplificada, baseada nos dados de custo final de aquisição, o custo energético de operação, o rendimento da evaporação, a economia gerada pela redução de volume a partir da secagem, assim como o conhecimento sobre a necessidade de manutenção que a máquina possui.

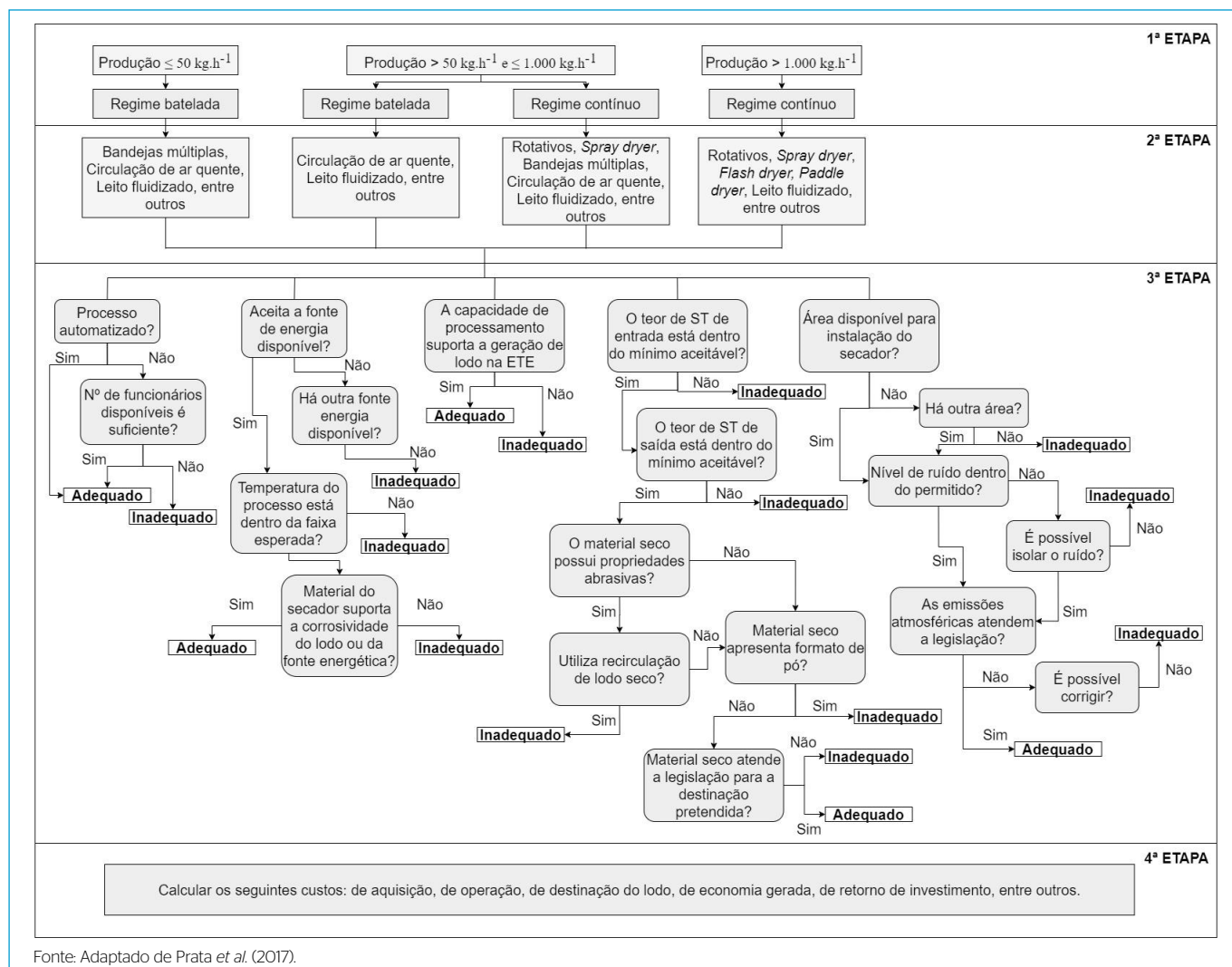


Figura 4 – Fluxograma de seleção de secadores térmicos de lodo para ETEs de grande porte.

Estudos em escala piloto também se mostram como uma opção para uma avaliação do secador térmico de lodo a ser adquirido em uma ETE. A Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) tem realizado, nos últimos anos, uma série de investigações em escala piloto de processos de secagem e higienização térmica de lodo. Um dos estudos desenvolvidos foi responsável pela instalação de um sistema térmico piloto, composto de um secador granulador rotativo capaz de processar até 100 kg.h^{-1} de lodo úmido, em uma ETE localizada no município de Curitiba. A ETE é dotada de seis reatores UASB, responsáveis pela produção de $80 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ de biogás, utilizado como fonte de energia térmica para o secador piloto. O sistema piloto foi responsável por reduzir em aproximadamente 79% a massa de lodo submetida a esse processo, aumentando a

concentração de ST presentes no material de 23 % para 84 %. Ademais, os resultados evidenciaram a completa higienização do lodo anaeróbico alimentado no secador piloto, sendo compatível com o biossólido Classe A (POSSETTI *et al.*, 2015). Com um teor médio de metano de aproximadamente 78%, a vazão de biogás utilizada nesse sistema foi, em média, $15 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$, sendo necessários 1.323 kcal para remover 1 kg de água presente no lodo ($1,5 \text{ kWh.kg}^{-1}$ água). Outro estudo realizado pela SANEPAR foi responsável pela instalação de um secador piloto do tipo *flash dryer* em uma ETE também localizada no município de Curitiba. Com uma capacidade de processamento de lodo de 250 kg.h^{-1} , o equipamento utilizou como insumo energético gás liquefeito de petróleo (GLP). Os resultados do estudo piloto evidenciaram um aumento no teor

de ST do lodo de 19% para 90%. O consumo energético desse sistema demandou 1.490 kcal para remover 1 kg de água presente no lodo ($1,7 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ água}$). Também foram evidenciadas significativas reduções de patógenos presentes no material. Em ambos os estudos realizados,

o lodo anaeróbio empregado foi previamente desaguado em centrífugas até atingir teores de ST próximos a 20%.

O **Exemplo 2** ilustra os cálculos referentes a alternativa de uso do biogás gerado em ETEs de grande porte para cogeração de calor (secagem térmica do lodo) e eletricidade.

Exemplo 2: Estimar o uso do biogás gerado em ETEs de grande porte para cogeração de calor e eletricidade em motores de combustão interna (CHP), sendo o calor dos gases de exaustão utilizado para secagem e higienização do lodo

Dados de entrada:

- População de projeto (P): 250.000 habitantes
- Contribuição per capita de esgoto (QPC): $165 \text{ L} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$
- Taxa de contribuição por infiltração (T_{inf}): $0,1 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$
- Extensão de rede por habitante ($L_{\text{rede} \cdot \text{hab}^{-1}}$): $1,5 \text{ m} \cdot \text{hab}^{-1}$
- Contribuição per capita de DQO (QPC_{DQO}): $0,10 \text{ kg} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$
- Concentração média afluyente de DQO (C_{COD}): $562 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($0,562 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
- Eficiência de remoção de DQO (em termos de DQO filtrada) (E_{DQO}): 80%
- Produção de metano (Y_{CH_4}): $0,130 \text{ N m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{kgDQO}_{\text{rem}}^{-1}$
- Poder calorífico inferior do metano (PCI_{CH_4}): $9,9 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$
- Produção de lodo (Y_{lodo}): $0,15 \text{ kgST} \cdot \text{kgDQO}_{\text{apl}}^{-1}$
- Massa específica do lodo (γ): $1,020 \text{ kgST} \cdot \text{m}^{-3}$
- Concentração do lodo removido dos reatores UASB ($C_{\text{lodo} \cdot \text{UASB}}$): 4%
- Concentração de ST no lodo após a centrifuga ($C_{\text{lodo} \cdot \text{centrifuga}}$): 20%
- Concentração de ST no lodo após o secador térmico ($C_{\text{lodo} \cdot \text{secador} \cdot \text{térmico}}$): 80%
- Captura de sólidos na centrifuga ($CS_{\text{centrifuga}}$): 90%
- Captura de sólidos no secador térmico ($CS_{\text{secador} \cdot \text{térmico}}$): 90%
- Eficiência elétrica do CHP (η_{el}): 35%
- Relação entre o conteúdo de calor nos gases de exaustão e a energia total do biogás consumido pelo CHP ($R_{\text{exaustão}}$): 25%
- Eficiência térmica do secador térmico ($\eta_{\text{secador} \cdot \text{térmico}}$): 80%
- Energia requerida para evaporar 1 kg de água ($E_{\text{evaporação}}$): 1,0 kWh

Solução:

a) Cálculo da vazão média de esgoto bruto Q:

$$Q_{\text{med}} = P \times QPC \times \frac{1d}{86.400s} + P \times L_{\text{rede}} \cdot \text{hab}^{-1} \times T_{\text{inf}}$$

$$Q_{\text{med}} = 250.000 \text{ hab} \times 165 \text{ L} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \times \frac{1d}{86.400s} + 250.000 \text{ hab} \times 1,5 \text{ m} \cdot \text{hab}^{-1} \times \frac{1km}{1000m} \times 0,1 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$Q_{\text{med}} = 515 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \quad (44.496 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$$

b) Carga orgânica removida (CO_{rem}):

$$CO_{\text{rem}} = Q_{\text{med}} \times C_{\text{COD}} \times E_{\text{COD}} = 44.496 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \times 0,562 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 0,80 = 20.005 \text{ kgDQO}_{\text{rem}} \cdot \text{d}^{-1}$$

c) Produção diária de metano (Q_{CH_4}):

$$Q_{\text{CH}_4} = CO_{\text{rem}} \times Y_{\text{CH}_4} = 20.005 \text{ kgDQO}_{\text{rem}} \cdot \text{d}^{-1} \times 0,130 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{kgDQO}_{\text{rem}}^{-1} = 2.601 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{d}^{-1}$$

d) Quantidade de energia química no biogás ($E_{\text{biogás}}$):

$$E_{\text{biogás}} = Q_{\text{CH}_4} \times PCI_{\text{CH}_4} = 2.601 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \times 9,9 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3} = 25.747 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$$

e) Produção diária de lodo nos reatores UASB ($P_{\text{lodo} \cdot \text{UASB}}$):

$$P_{\text{lodo} \cdot \text{UASB}} = Q_{\text{média}} \times C_{\text{DQO}} \times Y_{\text{lodo}} = 44.496 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \times 0,562 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 0,15 \text{ kgST} \cdot \text{kgDQO}_{\text{apl}}^{-1} = 3.751 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1}$$

f) Produção volumétrica diária de lodo nos reatores UASB ($Q_{\text{lodo} \cdot \text{UASB}}$):

$$Q_{\text{lodo-UASB}} = P_{\text{lodo-UASB}} \div (C_{\text{lodo-UASB}} \times \gamma) = 3.751 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1} \div (0,04 \times 1.020 \text{ kgST} \cdot \text{m}^{-3}) = 91,9 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \text{ com } 4\% \text{ ST}$$

g) Produção diária de lodo após a desidratação ($Q_{\text{lodo-centrifuga}}$):

$$Q_{\text{lodo-centrifuga}} = (P_{\text{lodo-UASB}} \times CS_{\text{centrifuga}}) \div (C_{\text{lodo-centrifuga}} \times \gamma)$$

$$Q_{\text{lodo-centrifuga}} = (3.751 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1} \times 0,90) \div (0,20 \times 1.020 \text{ kgST} \cdot \text{m}^{-3}) = 16,5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \text{ com } 20\% \text{ ST}$$

h) Geração de energia elétrica (E_{el}):

$$E_{\text{el}} = E_{\text{biogás}} \times \eta_{\text{el}} = 25.747 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1} \times 0,35 = 9.011 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$$

i) Geração de calor pelos gases de exaustão do CHP ($E_{\text{gases-exaustão}}$):

$$E_{\text{gases-exaustão}} = E_{\text{biogás}} \times R_{\text{exaustão}} \times \eta_{\text{secador-térmico}} = 25.747 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1} \times 0,25 \times 0,80 = 5.149 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$$

j) Produção volumétrica diária após secagem térmica ($Q_{\text{lodo-secador-térmico}}$):

$$Q_{\text{lodo-secador-térmico}} = (P_{\text{lodo-centrifuga}} \times CS_{\text{secador-térmico}}) \div (C_{\text{lodo-secador-térmico}} \times \gamma)$$

$$Q_{\text{lodo-secador-térmico}} = (3.376 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1} \times 0,90) \div (0,80 \times 1.020 \text{ kgST} \cdot \text{m}^{-3}) = 3,7 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \text{ com } 80\% \text{ ST}$$

k) Massa de água evaporada ($M_{\text{água}}$):

$$M_{\text{água}} = Q_{\text{lodo-centrifuga}} - Q_{\text{lodo-térmico}} = 16,5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} - 3,7 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} = 12,8 \text{ m}^3_{\text{água}} \cdot \text{d}^{-1} \text{ ou } 12.800 \text{ kg}_{\text{água}} \cdot \text{d}^{-1}$$

l) Demanda de energia térmica (E_{demanda}):

$$E_{\text{demanda}} = M_{\text{água}} \times E_{\text{evaporação}} = 12.800 \text{ kg}_{\text{água}} \cdot \text{d}^{-1} \times 1,0 \text{ kWh} \cdot \text{kg}_{\text{água}}^{-1} = 12.800 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$$

m) Balanço de energia térmica:

A quantidade de calor gerada a partir dos gases de exaustão do motor CHP ($E_{\text{gases-exaustão}} = 5.149 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$) é suficiente para atender cerca de 40% da energia térmica necessária para secar todo o lodo produzido na ETE ($E_{\text{demanda}} = 12.800 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$).

Cenário 1 (secagem de todo o lodo gerado nas centrifugas: 3.376 kgST.d⁻¹)

Uma forma de secar todo esse lodo é a combustão desse material e aproveitamento dos gases térmicos desse processo para injetar também no secador térmico. Considerando o poder calorífico inferior do lodo seco de $2,9 \text{ kWh} \cdot \text{kgST}^{-1}$ ($\text{PCI}_{\text{lodo-base seca}}$) e uma eficiência térmica do combustor de 80% ($\eta_{\text{combustor}}$), seria possível obter cerca de $7.800 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$ de energia. Assim, a partir da complementação com os gases quentes provenientes da combustão do lodo seco, o processo de secagem térmica pode ser realizado de forma sustentável na ETE. Além disso, com o uso do combustor, a redução do volume do lodo que entra no secador térmico pode chegar a até 90%, gerando cinzas como resíduo final

Cenário 2 (secagem de 40% do lodo gerado na desidratação - centrifuga: 1.350 kgST.d⁻¹)

Uma segunda opção consiste no envio de apenas 40% do lodo da centrifuga ($6,6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) para o secador térmico. O restante do lodo deve ser higienizado por outro processo, tal como a estabilização alcalina prolongada.

a) Quantidade de lodo encaminhada ao secador térmico ($Q_{\text{lodo-centrifuga}}$)

$$Q_{\text{lodo-centrifuga}} = (P_{\text{lodo-centrifuga}} \times 0,40) \div (C_{\text{lodo-centrifuga}} \times \gamma)$$

$$Q_{\text{lodo-centrifuga}} = (3.376 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1} \times 0,40) \div (0,20 \times 1.020 \text{ kgST} \cdot \text{m}^{-3}) = 6,6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \text{ com } 20\% \text{ ST}$$

b) Produção volumétrica diária de lodo após secagem térmica ($Q_{\text{lodo-secador-térmico}}$)

$$Q_{\text{lodo-secador-térmico}} = (P_{\text{lodo-centrifuga}} \times CS_{\text{secador-térmico}}) \div (C_{\text{lodo-secador-térmico}} \times \gamma)$$

$$Q_{\text{lodo-secador-térmico}} = (1.350 \text{ kgST} \cdot \text{d}^{-1} \times 0,90) \div (0,80 \times 1.020 \text{ kgST} \cdot \text{m}^{-3}) = 1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \text{ com } 80\% \text{ ST}$$

c) Estimativa da massa de água evaporada ($M_{\text{água}}$):

$$M_{\text{água}} = Q_{\text{lodo-centrifuga}} - Q_{\text{lodo-térmico}} = 6,6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} - 1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} = 5,1 \text{ m}^3_{\text{água}} \cdot \text{d}^{-1} \text{ ou } 5.100 \text{ kg}_{\text{água}} \cdot \text{d}^{-1}$$

d) Demanda de energia térmica (E_{demanda}):

$$E_{\text{demanda}} = M_{\text{água}} \times E_{\text{evaporação}} = 5.100 \text{ kg}_{\text{água}} \cdot \text{d}^{-1} \times 1,0 \text{ kWh} \cdot \text{kg}_{\text{água}}^{-1} = 5.100 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$$

e) Balanço de energia térmica:

Nesse cenário, a quantidade de calor gerada a partir dos gases de exaustão do motor CHP ($E_{\text{gases-exaustão}} = 5.149 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$) é suficiente para atender a energia térmica necessária para secar 40% do lodo produzido na ETE ($E_{\text{demanda}} = 5.100 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$).

4. SECAGEM E HIGIENIZAÇÃO TÉRMICA DO LODO EM ETES DE PEQUENO E MÉDIO PORTE

Devido aos elevados custos de aquisição e operação, os secadores térmicos de lodos disponíveis no mercado geralmente não apresentam viabilidade econômica e financeira para serem implantados em ETES de pequeno e médio porte (População equivalente < 100.000 hab.). Desse modo, alternativas capazes de promover o tratamento do lodo de esgoto nessas ETES são compostas por sistemas simplificados de secagem e higienização térmica com aproveitamento do biogás produzido em reatores UASB, tais como (Figura 5):

1. Alternativa A: leito de secagem convencional modificado para promover a secagem e higienização do lodo de forma simultânea, baseado nos estudos de Andreoli *et al.* (2002) e Ferreira *et al.* (2003).
2. Alternativa B: tanque aquecido para higienização seguido de leito de secagem convencional, baseado nos estudos de Borges *et al.* (2009).

3. Alternativa C: leito de secagem convencional seguido de leito aquecido para higienização, baseado nos estudos de Possetti *et al.* (2012), Wagner *et al.* (2015), Gontijo *et al.* (2018) e Kuk (2019).

Essas soluções simplificadas normalmente se aplicam a ETES de pequena e média escala devido aos menores custos operacionais e de construção. Além disso, o calor produzido a partir do biogás pode ser combinado com o de outra fonte de energia, como a energia solar, por exemplo.

Na Alternativa A (Figura 6a), foi instalado um sistema de serpentinas de tubo de cobre na camada drenante de um leito de secagem convencional. No sistema de serpentinas foi inserido óleo aquecido a partir da queima de biogás em uma caldeira.

O biogás empregado no processo era oriundo do tratamento do esgoto em reatores UASB. A concepção desse sistema é baseada na transferência de calor do óleo para a serpentina de cobre, que por sua vez transfere calor para os blocos drenantes e estes, por fim, transmitem o calor residual para o lodo depositado sobre o leito de secagem.

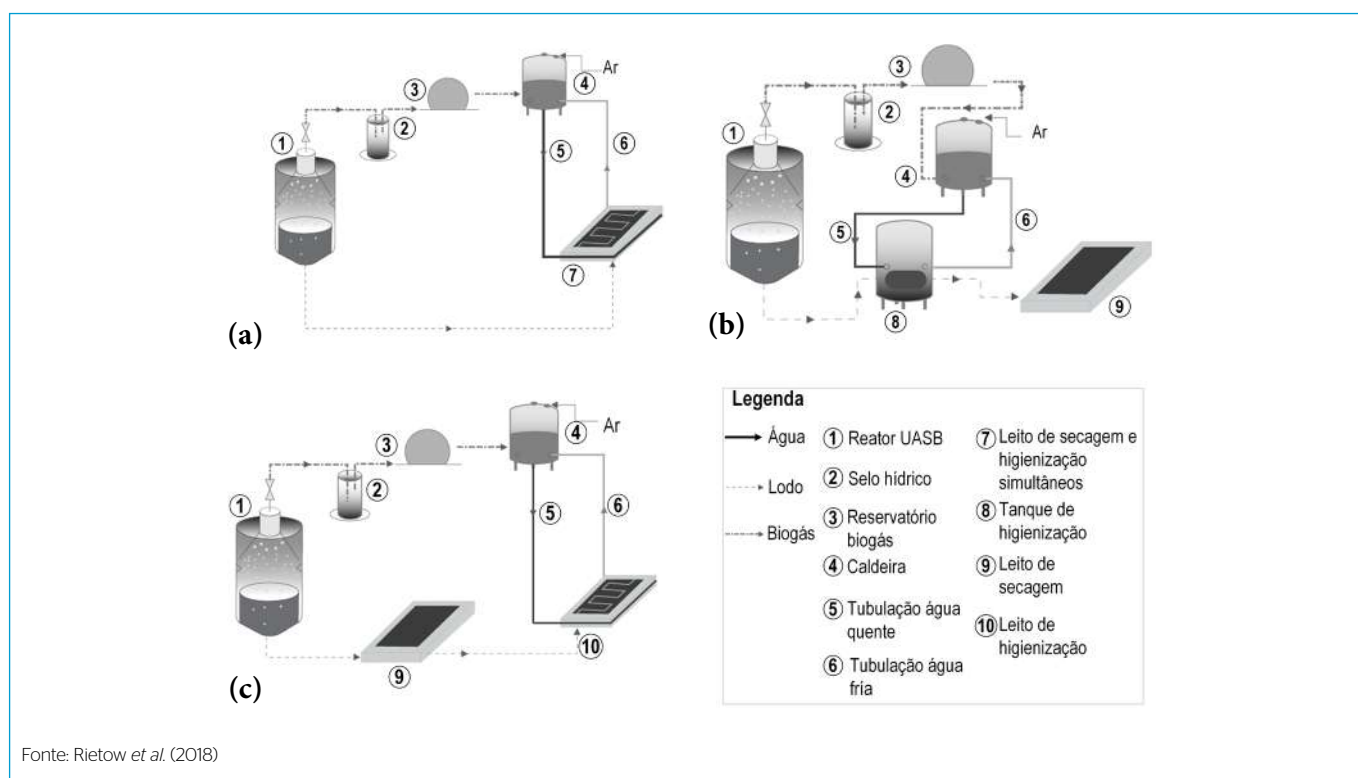


Figura 5 – Sistemas simplificados de secagem e higienização térmica do lodo para ETES de pequeno e médio porte: (a) leito de secagem convencional modificado para promover a secagem e higienização do lodo de forma simultânea; (b) tanque aquecido para higienização seguido de leito de secagem convencional; (c) leito de secagem convencional seguido de leito aquecido para higienização.

Os resultados obtidos no estudo apresentaram uma redução significativa no teor de umidade do lodo empregado (ST inicial de ~10%, se elevando, ao final de 15 dias, para um teor de ST de ~90%), bem como evidenciaram o enquadramento desse material como biossólido classe A (de acordo com o critério da Resolução CONAMA nº 375/2006, revogada). Entretanto, cabe destacar que o uso do óleo aquecido pode provocar, caso negligenciada as questões de controle de temperatura do sistema, possíveis riscos de incêndio (ANDREOLI *et al.*, 2002).

Outra possibilidade para a Alternativa A, consiste na cobertura do leito de secagem modificado com uma estufa plástica tipo “Túnel Hermano” (Figura 6b). O sistema investigado apresentou uma redução superior a 90% de ovos viáveis de helmintos em um período de 10 dias. A massa de lodo depositada sobre o leito apresentou uma temperatura média durante os ensaios de 46 °C. Além disso, o teor de ST no lodo se elevou de 9% para valores superiores a 80% em um período de 15 dias (FERREIRA *et al.*, 2003).

Em relação a Alternativa B, Borges *et al.* (2009) realizaram estudos de higienização térmica do lodo como etapa preliminar ao processo de desaguamento em leitos de secagem convencionais, a partir de aparato experimental em escala piloto composto de um tanque térmico seguido de um leito de secagem convencional. No tanque térmico, o lodo de esgoto foi submetido a temperaturas de 55 a 65 °C, durante três a cinco horas. Tal condição possibilitou a completa eliminação de ovos viáveis de helmintos no material.

Entretanto, acarretou em uma piora significativa no processo de desaguamento nos leitos de secagem, devido a formação de uma camada pouco permeável no fundo dos leitos. Isto se deve ao fato do lodo tratado termicamente apresentar uma grande viscosidade, ocasionada pelo rompimento dos flocos. Os resultados apontaram que o lodo previamente higienizado atingiu, em sete dias de operação, um teor de ST de 7,9 a 12,4 %.

Na Alternativa C, o fluxograma do sistema é muito semelhante ao da Alternativa A, no entanto, como material da serpentina foi empregado uma tubulação de polietileno reticulado com alma de alumínio. Na base do leito de higienização foi utilizada uma camada de concreto contendo aditivos plastificantes (Figura 5-a). Ao invés do óleo, a fonte de propagação de calor empregada foi água quente provida de um aquecedor apto a queimar biogás. O lodo depositado sobre o piso de concreto foi previamente desaguado, apresentando um teor inicial de ST de 15%. A operação ininterrupta desse sistema, denominado de Sistema Térmico de Higienização do Lodo (STHIL), ao longo de 7,5 dias, proporcionou o aquecimento da massa de lodo obtendo temperaturas médias de 59 °C, o que resultou em um teor de 27,6% de ST ao final desse período. As análises microbiológicas realizadas no material constatarem o enquadramento do número de ovos viáveis de helmintos dentro dos limites preconizados para uso agrícola do lodo (de acordo com o critério da resolução CONAMA nº 375/2006, revogada).



Fonte: Andreoli *et al.* (2002) e Ferreira *et al.* (2003)

Figura 6 – Leito de secagem convencional modificado para promover a secagem e higienização do lodo de forma simultânea: (a) tubulação de cobre colocada na camada drenante de um leito de secagem para a circulação do óleo aquecido; (b) cobertura do leito de secagem modificado com estufa plástica

Durante os primeiros 5 dias de operação, o STHIL foi coberto por uma lona plástica a fim de evitar a saída da água evaporada do sistema, fazendo com que a mesma fosse condensada na lona plástica e, posteriormente, precipitada sobre a massa de lodo. Tal prática permitiu um elevado teor de umidade presente no meio, favorecendo um maior fluxo de transferência de calor no lodo. Após esse período, a lona plástica foi retirada para que a água pudesse ser evaporada (POSSETTI *et al.*, 2012).

Na **Tabela 2** é apresentada a comparação técnica dos três sistemas simplificados de secagem e higienização térmica do lodo para ETEs de pequeno e médio porte apresentadas no presente documento. Adicionalmente, também é realizada a comparação dessas alternativas com o processo de estabilização alcalina (Alternativa D), apresentado na **NT 4** da presente coletânea (ANDREOLI *et al.*, 2022).

Outra alternativa avaliada consiste em um sistema térmico de piso radiante, construído em concreto convencional, contendo em seu interior uma serpentina de tubos de cobre. Como fonte de propagação de calor foi utilizada água aquecida por um coletor solar e também por uma resistência elétrica, sendo essa última responsável por simular um possível uso do biogás produzido em reatores UASB. Nesse caso, a energia solar promove o pré-aquecimento

do sistema, proporcionando uma redução significativa no consumo de biogás. Os resultados obtidos destacaram que o material, durante o estágio de higienização (cobertura plástica para manter o teor de umidade presente no lodo), apresentou uma temperatura média de 67 °C e o teor de ST foi elevado de 20% para 47,2% no sétimo dia e 88,1% ao final do décimo dia de operação (WAGNER *et al.*, 2015).

5. PRINCIPAIS PROBLEMAS RELACIONADOS AO PROCESSO DE SECAGEM E HIGIENIZAÇÃO TÉRMICA DO LODO

Dentre os principais problemas encontrados, durante o processo de secagem e higienização térmica, destacam-se o depósito de lodo nas paredes do secador durante a fase pegajosa e a formação de poeiras com potenciais riscos de explosão e incêndio. Os problemas inerentes a fase pegajosa do lodo são mais facilmente observados no processo de secagem indireta. Isto se deve pela transferência do calor nesse processo ser realizada de uma superfície/parede aquecida para o lodo úmido. Desse modo, caso ocorra formação de uma crosta de material durante a fase pegajosa, a eficiência do processo de secagem será consideravelmente prejudicada, podendo, em alguns casos, até mesmo danificar o secador.

Tabela 2 – Comparação das alternativas para a secagem e higienização térmica de lodo.

Aspectos avaliados		Alternativas			
		A	B	C	D
Econômicos	Consumo de energia elétrica	+	+++	++	+++
	Demanda de área	+++	++	+	++
	Autossuficiência energética por meio do aproveitamento do biogás	+	++	+++	Ø
Confiabilidade	Segurança de higienização	+	+++	++	+
	Segurança de secagem	+++	++	+++	+++
Simplicidade	Manuseio do lodo	+++	+++	++	+
	Manutenção	+	+++	++	+++
	Operação	+	+++	++	++
	Robustez das instalações	+	+++	++	+++
Social	Odor	++	+++	+	+
	Segurança dos operadores	++	+++	+	+
Ambiental	Emissão de gases de efeito estufa	++	+++	++	+

Notas: A: Leito de secagem convencional modificado para promover a secagem e higienização do lodo de forma simultânea; B: Tanque aquecido para higienização seguido de leito de secagem convencional; C: Leito de secagem convencional seguido de leito aquecido para higienização; D: Estabilização alcalina.

+++; mais favorável, ++; intermediário, +; pouco favorável, Ø: não aplicado.

Fonte: Adaptado de Rietow *et al.* (2018).

Os processos de secagem direta, por sua vez, apresentam menos riscos de possuírem problemas durante a fase pegajosa. Tal fato pode ser explicado devido ao fluxo de ar quente, em contato direto com o lodo úmido, propiciar uma dispersão/agitação capaz de impedir o depósito de materiais nas paredes do secador (CHEN *et al.*, 2015).

Para evitar os possíveis problemas intrínsecos à fase pegajosa, estratégias de recirculação de lodo seco e de aplicação de produtos químicos estão sendo empregadas por companhias de saneamento que possuem processos de secagem indireta. A recirculação de lodo seco tem por objetivo aumentar o teor de ST presente na mistura alimentada no secador para além da fase pegajosa (LÉONARD *et al.*, 2008). Embora essa seja uma prática já consolidada, destaca-se que a falta de um controle rigoroso do processo de recirculação pode acarretar em riscos de explosão e incêndio. No que diz respeito ao emprego de produtos químicos, estudos conduzidos por Peeters *et al.* (2013) evidenciaram que a aplicação de policloreto de alumínio (PAC) reduziu os efeitos negativos da fase pegajosa. Adicionalmente, Li *et al.* (2012) verificaram que a adição de cal, no lodo a ser encaminhado para o processo de secagem, reduziu o acúmulo de material depositado nas paredes do secador. Para que essas estratégias sejam corretamente adotadas, torna-se fundamental a realização de um estudo preliminar para determinação da fase pegajosa do lodo a ser submetido ao processo secagem térmica. Para tanto, recomenda-se a utilização dos protocolos estabelecidos por Kudra (2003) e Peeters *et al.* (2011).

A produção de poeira é outro problema que não pode ser negligenciado durante o processo de secagem térmica do lodo. Assim como o próprio lodo seco produzido, a poeira também pode se tornar um material combustível e, caso não gerenciada corretamente, pode causar potenciais riscos de explosão e incêndio. Desse modo, para que uma explosão de poeira ocorra, as seguintes condições devem ser satisfeitas (MANCHESTER, 2001):

- a poeira deve ter uma distribuição de tamanho de partícula (inferior a 500 μm) capaz de ficar em suspensão na atmosfera;
- a concentração da suspensão de pó deve estar dentro da faixa de explosão (concentração de poeira entre 50 a 200 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ e temperatura variando de 350 a 550 $^{\circ}\text{C}$);

- deve haver uma fonte de ignição de energia, em contato com a poeira em suspensão, suficiente para iniciar a propagação da chama ($> 250 \text{ mJ}$); e
- a atmosfera em que a poeira está suspensa deve conter oxigênio suficiente para suprir e manter a combustão (faixa de 9 a 12 % de oxigênio).

Além desses fatores, outros aspectos também podem influenciar no comportamento de uma explosão de poeira, sendo eles:

- a turbulência da nuvem de poeira na atmosfera;
- a composição química da poeira;
- o teor de umidade da poeira; e
- a pressão da atmosfera.

Explosões também podem ocorrer durante o armazenamento do lodo seco em silos. A camada de poeira depositada e/ou formada sobre o material seco pode propiciar o início de um incêndio ou até mesmo a formação de uma atmosfera explosiva. Outro ponto que deve ser destacado é que o acúmulo de poeira em superfícies quentes, como, por exemplo, as paredes de secadores, motores, dispositivos elétricos e acessórios de iluminação, pode fazer com que a temperatura mínima de ignição da poeira seja alcançada. Estudos realizados por Manchester (2001) evidenciaram que o contato da poeira com uma superfície aquecida entre 150 a 280 $^{\circ}\text{C}$ pode desencadear uma explosão e/ou início de incêndio.

A partir dessas constatações, recomenda-se que sejam adotadas em ETEs, que empreguem sistemas de secagem térmica de lodo, medidas de segurança para garantir que os riscos de explosões e incêndios, oriundos da produção de poeiras, sejam reduzidos tanto quanto possível. Essas medidas incluem: minimização da formação de nuvem de poeira, eliminação de potenciais fontes de ignição e classificação e/ou zoneamento de potenciais atmosferas explosivas. Adicionalmente, sistemas de proteção contra explosão, como ventilação de alívio, controle de temperatura e oxigênio, sistemas de supressão e de isolamento também podem se tornar necessários em casos específicos, como, por exemplo, em dispositivos de armazenamento de lodo seco. Maiores informações sobre medidas de segurança a serem tomadas em sistemas de secagem térmica de lodo

podem ser obtidas em Manchester (2001), Santha *et al.*, 2007 e Casal (2018).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de secagem térmica do lodo é uma das principais alternativas para reduzir os custos intrínsecos ao gerenciamento do lodo em ETEs. Além da redução significativa do volume, o lodo seco apresenta características que propiciam o seu aproveitamento tanto como biossólido como insumo energético. Apesar dessas vantagens, destaca-se que há limitações de ordem econômica, técnicas e operacionais que ainda limitam o emprego desse processo pelas companhias de saneamento no Brasil. Diante do novo marco legal de saneamento, que pretende alcançar nos próximos anos a universalização dos serviços de saneamento, entende-se que o gerenciamento do lodo produzido nas ETEs continuará sendo um dos principais desafios do setor. Sendo assim, o processo de

secagem térmica deverá ser encorajado e tido como uma alternativa, ainda mais em estações de tratamento de grande porte e com produção de biogás, capaz de alavancar os serviços de coleta e tratamento de esgoto sanitário no Brasil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis e do professor Dr. Marcelo Risso Errera do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da UFPR.

Este trabalho faz parte da série de publicações do INCT ETEs Sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ANDREOLI, C. V.; BICO, A. K.; BITTENCOURT, S.; PEGORINI, E. S.; POSSETTI, G. R. C.; CERQUEIRA, P. L. W.; RIETOW, J. C.; AISSE, M. M. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo – Nota Técnica 4 - Higienização de lodo via estabilização alcalina. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 45-58, 2022.
- ANDREOLI, C.V.; FERREIRA, A. C.; FRANÇA, M.; CHERUBINI, C. Desinfecção e secagem térmica de lodo de esgoto anaeróbio pelo uso de biogás. In: *XXVII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, Cancún, México. 2002. *Proceedings*. Cancún, México: AIDIS, 2002.
- ANDREOLI, C. V.; von SPERLING, M.; FERNANDES, F. *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 484 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuais, v. 6)
- ARLABOSSE, P.; FERRASSE, J. H.; LECOMPTE, D.; CRINE, M.; DUMONT, Y.; LÉONARD, A. Efficient sludge thermal processing: from drying to thermal valorization. *Modern Drying Technology: Energy Savings*, v. 4, p. 295-329, 2012.
- BENAMOUN, L.; ARLABOSSE, P.; LÉONARD, A. Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 28, p. 29-43, 2013.
- BITTENCOURT, S.; MATOS, A. T.; SILVA, B. S.; MIKI, M. K.; BASTOS, R. K. X. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo – Nota Técnica 2 - Aspectos legais. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 17-29, 2022.
- BORGES, E. S. M.; GODINHO, V. M.; BEJAR, D. O.; CHERNICHARO, C. A. L. Tratamento térmico de lodo anaeróbio com utilização do biogás gerado em reatores UASB: avaliação da autossustentabilidade do sistema e do efeito sobre a higienização e a desidratação do lodo. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 14, n. 3, p. 337-346, 2009.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Brasília, DF, 2020.

- CASAL, J. Dust Explosions. In: Casal, J. *Evaluation of the effects and consequences of major accidents in Industrial Plants*. 2th ed., Elsevier, v. 1, p. 243-267, 2018.
- CERQUEIRA, P. L. W. *Custos de Desaguamento e Higienização de Lodo em ETEs com Reatores UASB Seguidos de Pós-tratamento Aeróbio: Subsídios para Estudos de Concepção*. 2019. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- CHEN, G.; YUE, P. L.; MUJUMDAR, A. S. Dewatering and drying of wastewater treatment sludge. In: Mujumdar, A. S. *Handbook of industrial drying*. 4th ed. New York, USA: CRC Press, 2015. p. 887-904.
- DAVID, A. C. *Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio*. 2002. 163 f. Dissertação (Mestrado em Energia). Programa de Interunidades de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- FERREIRA R. A. R.; NISHIYAMA L. Uma revisão sobre a disposição controlada de lodo de esgoto no solo. In: *XXI Simpósio Regional de Geografia - Perspectivas para o cerrado no século*, Uberlândia, Brasil, 2003. *Proceedings*. Uberlândia, Brasil: Universidade Federal de Uberlândia, 2003.
- GONTIJO, J. C.; WAGNER, L. G.; SOUZA, M. E.; POSSETTI, G. R. C. Sanitation and drying of sewage sludge on radiant floors using solar energy and biogas: comparison between different thicknesses of deposited mass. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 61, 2018.
- HASSAN, S. S. A. S.; WANG, Y.; HU, S.; SU, SHENG; XIANG, JUN. Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 80, p. 888-913, 2017.
- HERNDON, J. Selecting the Right Biosolids Dryers: Part I and Part II. *Water & Wastes Digest*, p. 18-45, 2008.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 4^a ed. Rio de Janeiro, Brasil: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1998. 494 p.
- KEMP, I. C.; BAHU, R. E. A new algorithm for dryer selection. *Drying Technology*, v. 13 n. 5-7, p. 1563-1578, 1995.
- KUDRA, T. Sticky Region in Drying - Definition and Identification. *Drying Technology*, v. 21, n. 8, p. 1457-1469, 2003.
- KUK, T. N. *Alternativas para implantação de um sistema térmico de higienização e secagem do lodo gerado em estação de tratamento anaeróbio de esgoto sanitário de pequeno porte*. 2019. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental).
- Associação ampla entre Universidade Estadual do Centro-Oeste e Universidade Estadual de Ponta Grossa, Irati, 2019.
- LÉONARD, A.; MENESES, E.; LE TRONG, E.; SALMON, T.; MARCHOT, P.; TOYE, D.; CRINE, M. Influence of back mixing on the convective drying of residual sludges in fixed bed. *Water Research*, v. 42, p. 2671-2677, 2008.
- LI, H.; ZOU, S.; LI, C. Liming pretreatment reduces sludge build-up on the dryer wall during thermal drying. *Drying Technology*, v. 30, p. 1563-1569, 2012.
- LOBATO, L. C. S.; CHERNICHARO, C. A. L.; PUJATTI, F. J. P.; MARTINS, O. M.; MELO, G. C. B.; RECIO, A. A. R. Use of biogas for cogeneration of heat and electricity for local application: performance evaluation of an engine power generator and a sludge thermal dryer. *Water Science and Technology*, v. 67, p. 159-167, 2012.
- MANCHESTER, S. J. The fire and explosion hazards of dried sewage sludge. In: *Hazards XVI Symposium*, 2001. *Proceedings*. Manchester: IChemE Symposium Series, 2001.
- MUJUMDAR, A.S. *Handbook of Industrial Drying*. 4th ed., New York, USA: CRC Press, 2015. 1352 p.
- PEETERS, B.; DEWIL, R.; VERNIMMEN, L.; VAN DEN BOGAERT, B.; SMETS, I. Y. Addition of polyaluminium chloride (PACl) to waste activated sludge to mitigate the negative effects of its sticky phase in dewatering-drying operations. *Water Research*, v. 47, p. 3600-3609, 2013.
- PEETERS, B.; DEWIL, R.; VAN IMPE, J. F.; VERNIMMEN, L.; SMETS, I. Y. Using a Shear Test-Based Lab Protocol to Map the Sticky Phase of Activated Sludge. *Environmental Engineering Science*, v. 28, n. 1, p. 81-85, 2011.
- PERRY, R. H.; GREEN D. W. *Perry's chemical engineers' handbook*. 7th ed., New York, USA: McGraw-Hill companies, Inc., 1997. 2640 p.
- POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; CABRAL, C. B. G.; MOREIRA, H. C.; PLATZER, C.; BRESSANI-RIBEIRO, T.; CHERNICHARO, C.A.L. Energy recovery from biogas in UASB reactors treating sewage. In: Chernicharo, C.A.L.; Bressani-Ribeiro, T. (Eds.) *Anaerobic Reactors for Sewage Treatment: Design, Construction and Operation*. London, UK: IWA Publishing, 2019. p. 194-236.
- POSSETTI, G. R. C.; RIETOW, J. C.; GERVASONI, R.; ALTHOFF, C. A., CARNEIRO, C. Investigação experimental de um sistema piloto de secagem térmica de lodo movido a biogás. In: *28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, Brasil. *Proceedings*. Rio de Janeiro, Brasil: ABES, 2015.

POSSETTI, G. R. C.; JASINSKI, V. P.; ANDREOLI, C. V.; BITTENCOURT, S.; CARNEIRO, C. Sistema térmico de higienização de lodo de esgoto movido a biogás para ETEs de médio e pequeno porte. In: *Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Belo Horizonte, Brasil. *Proceedings*. Belo Horizonte, Brasil: ABES, 2012.

PRATA, L. L. V.; POSSETTI, G. R. C.; LIMONS, R. S. Método para a seleção de secadores térmicos de lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto doméstico. In: *29º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2017, São Paulo, Brasil. *Proceedings*. São Paulo, Brasil: ABES, 2017.

RIETOW, J. C.; WAGNER, L. G.; CARNEIRO, C.; AISSE, M. M.; POSSETTI, G. R. C. Estudo comparativo entre alternativas de sistemas de secagem e higienização térmica de lodo para estações de tratamento de esgoto de médio e pequeno porte. In: *1º Seminário Nacional sobre Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto*, 2018, Curitiba, Brasil: INCT ETEs Sustentáveis, 2018.

SANTHA, H.; BLANTON, K.; HOENER, W.; SHIMP, G. Biosolids Heat Drying: Safety in Design & Owner Operation. *Florida Water Resources Journal*, p. 14-19, 2007.

STRUMILLO, C.; KUDRA T. *Drying: Principles, Applications and Design*. New York, Gordon and Breach, 1986. 448 p.

VALENTE, V. B. Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil. 2015. 198 f. Dissertação (Mestrado em planejamento energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

WAGNER, L. G.; POSSETTI, G. R. C.; CARNEIRO, C.; URBANETZ, J. Sistema térmico de higienização e secagem térmica de lodo de esgoto movido a energia solar e biogás. In: *Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural*, 2015, São Paulo, Brasil. *Proceedings*. São Paulo, Brasil: PPGE, PROCAM, 2015.

Parte A: Higienização e uso de lodo de esgoto no solo

Nota Técnica 6 – Uso agrícola de biossólido

Part A: Sanitization and use of sewage sludge in soil
Technical Note 6 - Agricultural use of biosolids

**Simone Bittencourt^{1*}, Antônio Teixeira de Matos^{2(t)}, Bruno Sidnei da Silva³, Fernando Carvalho Oliveira⁴,
Lucas de Almeida Chamhum-Silva⁵, Marcelo Kenji Miki⁶, Alexandre Klas Bico⁷**

RESUMO

O biossólido resultante do tratamento do lodo gerado nas estações de tratamento de esgoto apresenta propriedades condicionantes do solo e é rico em nutrientes. Entretanto, apesar dos benefícios ao solo e às plantas, assim como o apelo sustentável, o uso agrícola do biossólido no Brasil ainda é pouco difundido. Esta nota técnica (NT) tem como objetivo apresentar algumas experiências brasileiras com biossólido à luz das legislações pertinentes, bem como discutir aspectos e potencialidades relacionados a esse uso. Os estados do Paraná e de São Paulo são as principais referências no uso agrícola do lodo, com experiências de higienização com estabilização alcalina e compostagem. Nesta NT são apresentados os critérios de limitação de uso, conforme a nova Resolução CONAMA n° 498/2020, bem como os desafios relacionados ao setor agrícola e à aceitação pública. São discutidos ainda as políticas públicas de apoio aos produtores rurais para a aplicação do biossólido, para fomentar a transformação de um rico subproduto do tratamento de esgoto em um recurso para uso agrícola, em uma visão de economia circular.

Palavras-chave: subproduto; uso sustentável; lodo de esgoto; economia circular.

ABSTRACT

The biosolids resulting from the sludge treatment from sewage treatment plants improve soil conditioning and are rich in nutrients. However, despite the benefits to soil and plants, as well as the sustainable appeal, the agricultural use of biosolids in Brazil is still not widespread. In this Technical Note (TN), the objective is to present some Brazilian experiences with biosolids in the light of relevant legislation, as well as to discuss aspects and potential related uses. Paraná and São Paulo states are the main references in agricultural use, with experiences of sanitization with alkaline stabilization and composting. In this TN the criteria for the use of biosolids are presented, according to the new CONAMA Resolution 498/2020, as well as the challenges related to the agricultural sector and public acceptance. Public policies to support rural producers for the application of biosolids are also discussed, to promote transformation of a rich by-product of sewage treatment into a resource for agricultural use, in a vision of circular economy.

Keywords: by-product; sustainable use; sewage sludge; circular economy.

¹Engenheira Agrônoma, Mestre em Agronomia e Doutora em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Profissional da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). Professora do Curso de Gestão Ambiental da Faculdade Fael.

²Engenheiro Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), Doutor em Solos e Nutrição de Plantas pela UFV. Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

³Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre em Ciências pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Profissional da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP).

⁴Engenheiro Agrônomo pela Universidade Estadual Paulista (FCAV-UNESP). Mestre e Doutor em Solos Nutrição de Plantas pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (ESALQ-USP). Responsável Técnico da Tera Ambiental Ltda.

⁵Engenheiro Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

⁶Engenheiro Civil, Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Profissional da SABESP.

⁷Graduando em Agronomia pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR).

(t) in memoriam

*Endereço para correspondência: Rua Engenheiro Antônio Batista Ribas, 151 - casa 1. Tarumã, Curitiba, PR. CEP 82.800-130. E-mail: sbittencourt@sanepar.com.br

1. INTRODUÇÃO

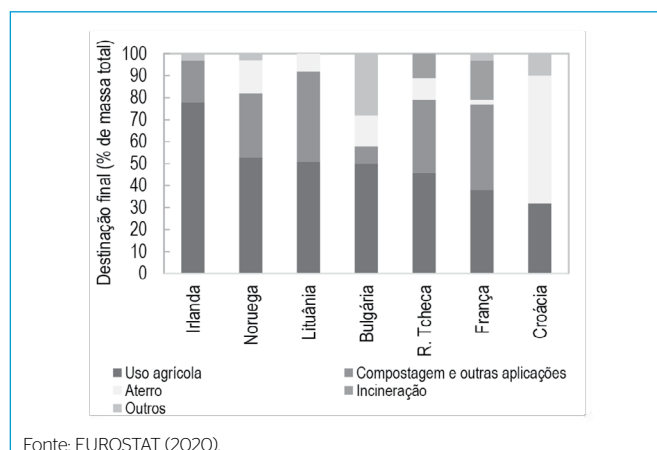
As melhorias proporcionadas ao solo, o aumento de produtividade dos cultivos e a redução nos custos de produção tornam o uso do biofóssido em áreas agrícolas relevante. Esses resultados positivos têm efeitos ambientais, sociais e econômicos benéficos na região onde a atividade é desenvolvida.

A destinação do biofóssido para uso agrícola é uma forma ambientalmente sustentável, estando em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), contribuindo para o conceito estratégico de economia circular, fundamentado na redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia.

A Organização Mundial de Saúde (OMS), em suas diretrizes para o destino seguro dos subprodutos do tratamento de esgoto, recomenda a utilização agrícola do lodo como forma de minimizar as pressões causadas pelo aumento populacional, pela escassez e degradação de recursos hídricos resultantes do destino inadequado de resíduos, e pela crescente demanda por alimentos (SILVA, 2007). A destinação agrícola cumpre os objetivos da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, como o de fome zero, de boa saúde e bem-estar, de água limpa e saneamento, de cidades e comunidades sustentáveis e de consumo e produção responsáveis (ONU, 2019).

Em muitos países, as políticas de sustentabilidade incluem o incentivo a reciclagem de resíduos biodegradáveis, incluindo o uso agrícola de biofóssido. Os Estados Unidos encontram-se entre os países que historicamente destinam o biofóssido para uso agrícola. No país, em 2019, foram geradas cerca de 4,75 milhões de toneladas de biofóssidos (em sólidos totais - ST), sendo que 51% desse total foi destinado para aplicação em solo (1,4 milhões para uso agrícola e 1 milhão para usos não agrícolas), 22% para disposição em aterro, 16% para incineração, 11% para outros usos (US EPA, 2020). A Austrália também, tradicionalmente, faz uso agrícola de biofóssido, destinando para esse uso 67% das 371 mil toneladas (ST) geradas por ano (AUSTRALIAN e NEW ZEALAND BIOSOLIDS PARTNERSHIP, 2020).

Na União Europeia (UE), o cenário de destinação final é diversificado, conforme apresentado na **Figura 1** (EUROSTAT, 2020). Por um lado, o aterro sanitário figura tanto como



Fonte: EUROSTAT (2020).

Figura 1 - Países da União Europeia que destinaram maior porcentagem (% de massa total) de biofóssido para agricultura, ano base 2017.

alternativa principal de destinação final (Croácia), como praticamente inexistente (Irlanda e França); a mesma diversidade pode ser observada para a incineração, uma realidade apenas para França e República Tcheca. Por outro lado, o uso agrícola representa uma importante estratégia em todos os países apresentados na Figura 1, fato também observado em países como Portugal, Reino Unido e Espanha, que historicamente utilizam o biofóssido na agricultura.

No Brasil, em que se pese o grande potencial para uso agrícola de biofóssido, a principal forma de destinação final ainda são os aterros sanitários. Esse fato é consequência, entre outros fatores, da dificuldade de cumprimento da Resolução nº 375/2006 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) (BRASIL, 2006), que apresentava critérios e padrões para o uso agrícola de lodo de esgoto, por vezes impeditivos, considerando as especificidades locais e regionais brasileiras, e que foi revogada a partir da publicação da Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020 (BRASIL, 2020). Dentre os poucos estados que têm experiências com essa prática de destinação estão São Paulo e Paraná.

Nesse contexto, a presente nota técnica (NT) tem como objetivo a apresentação e discussão dos principais tópicos de interesse em relação ao uso agrícola de biofóssido, sendo abordados: (i) experiências brasileiras; (ii) potencialidades dessa prática; (iii) aspectos referentes a aplicação no solo; e (iv) perspectivas, incluindo os principais desafios e possíveis indutores dessa prática.

2. EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS DE USO DE BIOSSÓLIDO EM SOLO

No Paraná, entre 2007 e 2017, foram aplicadas em 15.423 ha de áreas agrícolas, 285.836 toneladas de biossólido (equivalente a 130.895 t-ST), proveniente de lodo de esgoto tratado por processo de estabilização alcalina prolongada (EAP)¹, a uma dose média de aplicação de 8,5 t-ST·ha⁻¹. O material foi aplicado em cultivos de cevada, feijão, café, milho, eucalipto, pinus, implantação de grama, adubação verde, implantação

e pós-colheita de fruteiras de caroço, amora para bichos-da-seda, aveia, citros (laranja, pokan, limão Taiti), noz-pecã, seringueira, azevém, soja, cana-de-açúcar e trigo, beneficiando 290 agricultores em 81 municípios (BITTENCOURT, 2018). Na **Tabela 1** são apresentadas as características do biossólido, destinado na forma de lotes, no Paraná.

Embora essa experiência seja anterior a publicação da Resolução CONAMA nº 498/2020, é possível observar (Tabela 1) que a média das concentrações das substâncias

Tabela 1 – Parâmetros agronômicos, substâncias químicas e qualidade microbiológica de lotes de biossólido destinados para uso agrícola no Paraná, em 2017 e 2018.

Parâmetro		Unidade	Média ^(a)	Desvio Padrão	Classe 1 CONAMA nº 498/20
Parâmetros Agronômicos	pH _{H2O}	-	11	1	
	Sólidos Totais (ST)	%	64	15	
	Sólidos Voláteis Totais (SVT)	% ST	25	7	
	Carbono orgânico		9	4	
	N Kjeldahl		1,1	0,4	
	Nitrogênio amoniacal		0,02	0,04	
	Nitrogênio (nitrato+nitrato)		0,04	0,1	
	Fósforo		0,3	0,1	
	Potássio		0,07	0,03	
	Cálcio		10	2	
	Magnésio		5	2	
	Enxofre		1,1	0,4	
	Sódio		0,03	0,02	
Substâncias Químicas	Arsênio	mg·kg ⁻¹ ST	6	1	41
	Bário		208	95	1.300
	Cádmio		6	-	39
	Chumbo		24	11	300
	Cobre		117	72	1.500
	Cromo		32	31	1.000
	Mercurio		0,4	0,3	17
	Molibdênio		7	2	50
	Níquel		21	26	420
	Selênio		6	-	36
	Zinco		387	143	2.800
	Qualidade Microbiológica		Coliformes termotolerantes	NMP·g ⁻¹ ST ^(b)	3
Ovos viáveis de helmintos		Ovo·g ⁻¹ ST	<0,1	0	
<i>Salmonella sp</i>		NMP·4 ⁻¹ ·g ⁻¹ ST	Ausência	0	
Vírus		UFF ou UFP·g ⁻¹ ST ^(c)	<0,25	-	

Notas: Número de lotes analisados: 93. ^(a)Para o cálculo da média, utilizou-se o limite de quantificação (LQ) para resultado <LQ (As, Cd, Mo e Se < 6 mg·kg⁻¹ ST; Cr, Cu e Pb < 20 mg·kg⁻¹ ST; Hg < 0,2 mg·kg⁻¹ ST; Ni < 10 mg·kg⁻¹ ST; Ba e Zn < 100 mg·kg⁻¹ ST; coliformes < 0,1 NMP·g⁻¹ ST). ^(b)NMP·g⁻¹ ST: número mais provável por grama de sólidos totais. ^(c)UFF ou UFP·g⁻¹ ST: unidade formadora de foco ou unidade formadora de placa por grama de sólidos totais.

Fonte: Bittencourt (2018)

¹ Ver NT 4 desta coletânea (ANDREOLI *et al.*, 2021).

químicas se apresenta significativamente inferior aos limites da Resolução CONAMA nº 498/2020 para biossólido Classe 1 (BRASIL, 2020). Isso se deve ao esgoto afluente às estações de tratamento de esgoto (ETE) ser proveniente de áreas de baixa atividade industrial e aos critérios utilizados pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) para recebimento de efluentes não domésticos, acarretando um lodo com menores concentrações de substâncias químicas. O estabelecimento de critérios para recebimento de efluentes não doméstico é uma prática adotada por diversos prestadores de serviço de esgotamento sanitário, e se justificativa, dentre outras questões, para manutenção da integridade das redes coletoras, segurança dos trabalhadores e proteção da ETE contra eventuais contribuições prejudiciais ao processo de tratamento e/ou ao meio ambiente. Os parâmetros e limites podem ser mais ou menos restritivos em função de particularidades locais, como características das bacias de contribuição e do sistema de esgotamento sanitário (SANEPAR, 2013).

Já em São Paulo, as experiências mais recentes de uso de biossólido em solo são nos municípios de Botucatu, Matão e Jundiá. Em 2018, o Ministério da Agricultura, Pecuária

e Abastecimento (MAPA) concedeu à ETE Lageado, em Botucatu, os registros de estabelecimento produtor de insumo agrícola e de produto fertilizante orgânico composto Classe D obtido a partir de tratamento de lodo por um sistema de secagem e compostagem em estufa (Figura 2). As garantias do produto descritas no registro são de 3% de nitrogênio total, pH igual a 6, relação máxima de Carbono/Nitrogênio (C/N) de 6, capacidade de troca de cátions (CTC) de $400 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 20% de carbono orgânico total, umidade máxima de 50% e 10% de relação mínima de CTC/C (BRASIL, 2018).

Também em São Paulo, no município de Matão, a ETE São Lourenço obteve registro pelo MAPA de estabelecimento produtor de insumo agrícola. O produto é obtido a partir de um processo de estabilização alcalina, no qual a massa de lodo é elevada a um pH superior a 12, por um período mínimo de 2 horas, sendo mantido em pH 11,5 por mais 24 horas. O material recebe a adição de calcário dolomítico, gerando um fertilizante orgânico composto Classe D, denominado Ferticlean, o qual é utilizado nas culturas de citros, eucaliptos, cana-de-açúcar e café.



Fonte: Silva *et al.* (2017)

Figura 2 – Sistema de secagem e compostagem em estufa, ETE Lageado, Botucatu, SP.

O programa de gerenciamento e reciclagem de biossólido da ETE Jundiaí, iniciado em 2001, foi a segunda experiência no uso agrícola de biossólido no estado de São Paulo, sendo que a primeira foi implementada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) no município de Franca. O programa, seguindo critérios e procedimentos estabelecidos pela Norma Técnica P4.230 da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 1999), resultou na aplicação de biossólido em áreas de cana-de-açúcar e florestas cultivadas, conforme apresentado na **Tabela 2**.

A partir de 2007, com a vigência e os critérios restritivos estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 375/2006 (BRASIL, 2006), foi necessário modificar os processos de tratamento do lodo de esgoto na ETE Jundiaí, sendo iniciado testes pilotos de compostagem termofílica, adotada, em 2009, como processo de tratamento para produção de fertilizante orgânico composto Classe D, registrado no MAPA. Em 2020, a totalidade do lodo gerado pela ETE, cerca de 60.000 t·ano⁻¹ (20% ST), é tratada por processo de compostagem termofílica, juntamente com outros resíduos orgânicos, cerca de 30.000 t·ano⁻¹, tais como lodos de sistemas de tratamento de águas residuárias agroindustriais e restos de alimentos pré e pós-consumo, além do emprego de alguns insumos agrícolas. São empregadas duas concepções de compostagem - em leiras aeradas por revolvimento e em leiras estáticas com aeração forçada, e em ambas a temperatura alcança níveis acima de 55 °C. Como resultado produz-se aproximadamente 33.600 t·ano⁻¹ de fertilizante orgânico composto classe B (65% ST), registrado pelo MAPA, sendo comercializado para uso em culturas como café, citros, cana-de-açúcar, além de pastagens, hortaliças, flores, parques e jardins. As características do produto são apresentadas na **Tabela 3**.

3. POTENCIALIDADES DO USO AGRÍCOLA DE BIOSSÓLIDO NO BRASIL

O lodo de esgoto apresenta em sua constituição nutrientes necessários ao desenvolvimento vegetal, como Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca) Magnésio (Mg) e Enxofre (S). A concentração desses compostos no lodo está relacionada com as características do esgoto, o processo e operação do tratamento de esgoto e do lodo. Os nutrientes encontrados em maior quantidade no lodo são o N e o P. O Potássio (K) está presente em pequenas quantidades, pois é uma substância solúvel e, portanto, presente, em sua maior fração, na parte líquida do tratamento do esgoto. Os cátions Ca²⁺ e Mg²⁺, que são encontrados em pequenas quantidades no lodo de esgoto, podem estar em quantidade acima do original quando o biossólido passou por processo de redução de patógenos com uso de material alcalino.

Chamados de nutrientes principais, os macronutrientes N, P, K, Ca, Mg e S são absorvidos pela planta em maior proporção que os micronutrientes Boro (B), Zinco (Zn), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Molibdênio (Mo), Cloro (Cl) e Manganês (Mn) (também chamados de elementos traço). Tanto os macros como os micronutrientes são essenciais para o desenvolvimento vegetal, sendo encontrados nos minerais, material orgânico e dissolvidos na solução no solo. Alguns desses nutrientes podem estar em baixas concentrações no solo ou em uma forma não disponível para as plantas, demandando a sua reposição mediante a aplicação de fertilizantes minerais ou compostos orgânicos (RONQUIN, 2010).

Em nível de comparação, na **Tabela 4** são apresentadas concentrações médias de nutrientes e teor de ST de lodo de esgoto e outros materiais orgânicos, utilizados como condicionadores de solos e adubos orgânicos.

É importante destacar que, da mesma forma que as características do lodo de esgoto podem variar em função da composição do esgoto, do sistema de tratamento implantado e do método de operação adotado, os demais adubos orgânicos apresentados na Tabela 4, também, podem ter

Tabela 2 – Resultados do programa de gerenciamento e reciclagem de biossólido da ETE Jundiaí, de 2001 a 2009.

Áreas	Cultivo	Número de projetos	Área de aplicação (ha)	Quantidade aplicada (t)	ST (%)	Período
Agrícolas	Cana-de-açúcar	12	3.000,0	79.500	30	06/2001 a 12/2007
Florestas plantadas	Eucalipto	3	6.845,8	23.500	30	05/2001 a 03/2009

concentrações de nutrientes variáveis, de acordo com a origem do material, a espécie animal, a alimentação utilizada, a proporção entre os dejetos (fezes + urina), o material utilizado para cama e o manejo desses materiais orgânicos.

Devido a suas características, a aplicação agrícola de biossólido gera tanto benefícios ambientais, como benefícios agrônômicos e sociais. No Paraná, a aplicação do biossólido

alcalinizado em áreas agrícolas proporcionou aos agricultores uma redução média no custo com a compra de fertilizantes e corretivos de acidez do solo entre R\$ 443,28 e R\$ 584,19-ha⁻¹ (ano base 2014). Esse custo evitado foi devido ao fornecimento de nutrientes N, P, K e da correção de acidez de solo promovida pela aplicação de biossólido tratado por processo alcalino (BITTENCOURT, 2014; KNOPIK *et al.*, 2018).

Tabela 3 - Características do fertilizante orgânico composto classe B, produzidos na ETE Jundiá, São Paulo.

Parâmetro	Unidade	Média	Desvio padrão	Valor máximo MAPA*
Arsênio	mg·kg ⁻¹ ST	2,2	2,2	20
Cádmio		0,5	0,5	3
Chumbo		19,2	7,4	150
Cobre		141,7	51,3	-
Cromo		42,4	13,5	-
Mercurio		0,5	0,3	1
Molibdênio		6,5	3,7	-
Níquel		18,5	6,4	70
Selênio		0,9	0,2	80
Zinco		302,2	108,1	-
Cromo Hexavalente		< 0,55	-	2,0
Coliformes termotolerantes	NMP·g ⁻¹ ST	< 10 ³	-	< 10 ³
Ovos viáveis de helmintos	Ovo·4 ⁻¹ ·g ⁻¹ ST	< 1,0	-	< 1,0
<i>Salmonella</i> sp	NMP·4 ⁻¹ ·g ⁻¹ ST	Ausência	-	Ausência
Carbono Orgânico Total	% ST	16,3	2,5	
Umidade (máxima)		36,0	3,6	
N Total		1,7	0,2	
P ₂ O ₅ Total		3,1	0,7	
K ₂ O Total		1,2	0,2	
Calcio		5,5	1,3	
Magnésio		1,1	0,2	
Enxofre		1,1	0,3	
CTC	mmol _c ·kg ⁻¹ ST	544	235	
CTC/C (mínimo)		13	-	
C/N (máximo)		15	-	
pH		7,7	0,35	

Nota: *Brasil (2016)

Tabela 4 - Concentrações médias de nutrientes e teor de sólidos totais de materiais orgânicos

Material orgânico	Concentrações médias % (m/m) ^(a)						
	Carbono Orgânico	N ^(b)	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	Sólidos Totais
Cama de frango	25	3,8	4,0	3,5	4,5	1,0	75
Cama de peru	23	5,0	4,0	4,0	3,7	0,8	75
Cama de poedeira	30	1,6	4,9	1,9	14,4	0,9	72
Cama sobreposta de suíno	18	1,5	2,6	1,8	3,6	0,8	40
Esterco sólido de suínos	20	2,1	2,8	2,9	2,8	0,8	25
Esterco sólido de bovinos	30	1,5	1,4	1,5	0,8	0,5	20
Vermicomposto	17	1,5	1,3	1,7	1,4	0,5	50
Lodo de esgoto	30	3,2	3,7	0,5	3,2	1,2	5
Composto de resíduo sólido orgânico urbano	12	1,2	0,6	0,4	2,1	0,2	70
Cinza de casca de arroz	10	0,3	0,5	0,7	0,3	0,1	70

Notas: ^(a)Concentração calculada com base em material seco em estufa a 65°C. m/m = relação massa/massa. ^(b)A fração de N na forma amoniacal (N-NH₃ e N-NH₄⁺) é, em média, de 25% na cama de frangos, 15% na cama de poedeiras, 30% no lodo de esgoto, 25% no esterco líquido de bovinos e 50% no esterco líquido de suínos.

Fonte: adaptado de SBCE - Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC (2004)

O Brasil, com uma área plantada, em 2019, de cerca de 80 milhões de hectares (IBGE, 2020b) tem um grande potencial para ampliação do uso agrícola de biossólido. Predominam no País os solos profundos, altamente intemperizados, ácidos, de baixa fertilidade natural e, em certos casos, com alta saturação por alumínio (classes Latossolos e Argissolos), ocupando cerca de 58% da área nacional (EMBRAPA, 2020). Dessa forma, fazendo uma estimativa desse potencial, considerando a dose média de aplicação de 8,5 t-ST·ha⁻¹, verificada no Paraná (2007 a 2017), observa-se que a demanda por biossólido na área plantada em 2019 seria de 680 Mt-ST·ano⁻¹.

Do ponto de vista da geração de biossólido, apesar da ausência de inventários consolidados e atualizados acerca desta geração nas ETEs brasileiras, entende-se que a oferta potencial de biossólido está muito aquém da necessidade para atender essa demanda. A título de exemplo, apresenta-se na **Tabela 5** o potencial de geração de biossólido e de fornecimento de matéria orgânica e nutrientes, considerando dois cenários: i) hipotético, com 100% da população urbana atendida com serviços de coleta e tratamento de esgoto; e ii) atual, com 43% da população urbana atendida com coleta e tratamento de esgoto (BRASIL, 2017). Para estas estimativas de potencial, adotou-se um valor conservador de geração de lodo, da ordem de 15 g·hab⁻¹·d⁻¹ (VON SPERLING e GONÇALVES, 2001), referente à principal tipologia de tratamento de esgoto instalada no Brasil (reatores anaeróbios), bem como os valores médios de carbono orgânico, N, P e Zn apresentados na Tabela 1.

Mesmo na condição hipotética, de universalização dos serviços de esgotamento sanitário, a geração potencial de biossólido representa cerca de 0,15% da demanda estimada para toda a área plantada. Embora a maior parte dessa

demanda está provavelmente situada em áreas distantes dos pontos de geração, que inviabilizariam o transporte do biossólido, esta relação indica que, em um cenário de maior difusão do potencial contido neste subproduto e sua consequente valorização, pode haver uma demanda muito superior à oferta. Neste cenário, o lodo de esgoto, que ainda é comumente tratado como rejeito e relegado aos aterros sanitários, passaria a ser explorado como insumo agrícola (p. ex.: para produção de biossólido, fertilizantes organominerais ou outros produtos derivados), e eventualmente até disputado no mercado, haja vista sua geração limitada à capacidade instalada das ETEs.

Além dos macronutrientes N e P, o Zn foi utilizado para a estimativa apresentada na Tabela 5, em virtude desse elemento ser um dos micronutrientes mais limitantes para o desenvolvimento vegetal em solos do Cerrado brasileiro (VENDRAME *et al.*, 2007). Segundo Marques *et al.* (2004), quando comparados com solos de todo mundo, os solos do Cerrado possuem menos da metade do teor de Zn observado na média mundial. Estima-se que a necessidade potencial desse micronutriente para agricultura brasileira para uma área plantada de 50 milhões de hectares, seja de 50.000 t.ano⁻¹ (YAMADA, 2004).

Cabe ressaltar que a composição química do biossólido é variável, também em relação a micronutrientes, como o Zn. Dessa forma, a dose de aplicação em áreas agrícolas deve sempre ser calculada em função de análises de solo prévias e das necessidades nutricionais específicas de cada cultura, observando-se sempre o elemento limitante, ou seja, aquele elemento que estiver em maior concentração e mais próximo de atingir o limite máximo recomendado no solo para determinada planta cultivada (DALPISOL *et al.*, 2017).

Tabela 5 – Potencial de fornecimento de matéria orgânica e alguns nutrientes pelo biossólido, a partir da estimativa de geração de lodo em tratamento de esgoto em reatores anaeróbios

População	Número de habitantes ^(a)	Potencial de fornecimento (t·ano ⁻¹ base em ST) ^(b)				
		Produção de lodo de esgoto ^(c)	Matéria orgânica ^(d)	Nitrogênio (N)	Fósforo (P)	Zinco (Zn)
Urbana total	179.399.422	982.212	152.046	11.394	2.947	380
Com coleta e tratamento de esgoto	77.949.049	426.771	66.064	4.951	1.280	165

Nota: ^(a) IBGE (2020a). ^(b) Base em ST: referência ao teor de sólidos totais da amostra em questão, isto é, material residual após remoção de umidade da amostra. ^(c) Produção estimada em tratamento por sistema tipo UASB, com geração de lodo de 15 g·hab⁻¹·dia⁻¹ - de von Sperling e Gonçalves (2001). ^(d) Fator de conversão de carbono orgânico para matéria orgânica: 1,72.

4. ASPECTOS PARA APLICAÇÃO DO BIOSSÓLIDO

De acordo com a Resolução CONAMA nº 498/2020, a aplicação do biossólido em solos somente pode ocorrer mediante a elaboração de projeto específico para a área de aplicação, firmado por profissional devidamente habilitado, acompanhado da Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) (BRASIL, 2020).

No projeto deve estar descrita a origem e características do biossólido, o tipo de uso, a localização e características da área de aplicação, incluindo as restrições locais aplicáveis, como por exemplo, identificação de área de preservação permanente. A identificação do local e procedimentos de descarregamento do biossólido na área, os procedimentos de higiene e segurança, a recomendação de uso de equipamentos de proteção individual e as exigências legais, incluindo as restrições e os cuidados no uso e manuseio do lodo, também são itens que devem compor o projeto.

É necessário que o profissional responsável realize uma avaliação de aptidão na área, considerando os aspectos ambientais que interferem nos processos erosivos do solo e na mecanização, como profundidade de solo, textura superficial, suscetibilidade à erosão, drenagem, relevo, pedregosidade e hidromorfismo, a exemplo do descrito por Souza *et al.* (2008). Os resultados dessa avaliação, bem como, as práticas de proteção e conservação do solo e da água a serem adotadas devem estar descritas no projeto.

O projeto deve apresentar a dose de aplicação do biossólido, que é determinada com base nas características do solo, do biossólido e nas necessidades nutricionais das culturas e, se cabível, recomenda-se uma adubação complementar.

A determinação da dose de aplicação máxima do biossólido (em ST) é realizada utilizando o menor valor calculado com base nos critérios apresentados na Resolução CONAMA nº 498/2020:

1. Critério I: a dose de aplicação não deverá exceder o quociente entre a quantidade de nitrogênio recomendada para a cultura (N_{rec} , em $kg \cdot ha^{-1}$), e o teor de nitrogênio disponível (N_{disp} , em $kg \cdot t^{-1}$) no biossólido.
2. Critério II: para biossólido tratado por processo alcalino, a dose de aplicação não deverá exceder o quociente entre a necessidade de correção de acidez de solo (NC) da área na qual o biossólido será aplicado e o poder relativo de neutralização total (PRNT) ou poder de neutralização (PN) do biossólido.
3. Critério III: para biossólido Classe 2, a dose de aplicação não deverá exceder o valor mais limitante entre taxa máxima anual e carga máxima acumulada.

No **Exemplo** a seguir são apresentados os cálculos referentes as doses de aplicação do biossólido.

Exemplo: Calcular a dose máxima de aplicação de um biossólido tratado por estabilização alcalina, considerando os critérios I, II e III apresentados na Resolução CONAMA nº 498/2020, em uma cultura de milho.

Dados de entrada:

Características do biossólido

- Parâmetros agronômicos e substâncias químicas: médias de valores apresentadas na Tabela 1, com exceção do parâmetro Cobre, para o qual será adotado um valor de $4.305 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ o que torna o biossólido Classe 2.
- Poder de Neutralização (PN) do biossólido: 45,6%
- Fator de mineralização (FM) de lodo de esgoto digerido anaerobiamente: 20% (Paraná, 2009)

Características da área de aplicação

- Local de produção e uso do biossólido: estado do Paraná
- Última aplicação de biossólido: será a primeira aplicação de biossólido na área
- Tipo de uso: cultivo de milho
- Quantidade de nitrogênio recomendada para a cultura do milho (N_{rec}): $120 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (IAPAR, 2003)
- Saturação de bases esperada (V_e) do solo para a cultura do milho: 70% (IAPAR, 2003)

Características do solo da área de aplicação

pH	H	Al	H + Al	Ca + Mg	Ca	Mg	K	P	SB	CTC _{potencial}	MO mg·dm ⁻³	Va%
	cmol _c ·dm ⁻³											
5,00	4,20	0,20	4,40	4,70	2,90	1,80	0,25	11,00	4,95	9,35	28,00	52,94
As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn		
	mg·kg ⁻¹											
<3,0	<10,0	5	23	81	<0,0002	<6	25	73	0,10	432		

Notas: SB - Soma de Bases; MO - Matéria orgânica; Va - Saturação de bases atual do solo

Solução:

Critério I - A dose de aplicação não deverá exceder o quociente entre a quantidade de nitrogênio recomendada para a cultura (Nrec, em kg·ha⁻¹), e o teor de nitrogênio disponível (Ndisp, em kg·t⁻¹) no biossólido.

a) Determinação do teor de nitrogênio disponível (Ndisp):

$$N_{disp} = (FM/100) \times (\text{Nitrogênio kjeldahl} - \text{Nitrogênio amoniacal}) + 0,5 \times [(\text{Nitrogênio amoniacal}) + \text{Nitrato} + \text{Nitrito}]$$

$$N_{disp} = (20/100) \times (1,1 - 0,02) + 0,5 \times [(0,02) + (0,04)]$$

$$N_{disp} = 0,266 \% \text{ ou } 2,66 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$$

b) Determinação da dose de aplicação:

$$\text{Dose de aplicação} = \frac{N_{rec}}{N_{disp}} = \frac{120}{2,66} = 45,1 \text{ t ST} \cdot \text{ha}^{-1}$$

Critério II - Para biossólido tratado por processo alcalino, a dose de aplicação não deverá exceder o quociente entre a necessidade de correção de acidez de solo (NC) da área na qual o biossólido será aplicado e o poder relativo de neutralização total (PRNT) ou poder de neutralização (PN) do biossólido.

c) Determinação da necessidade correção de acidez do solo (NC), que neste exemplo foi obtida a partir do método de saturação de bases, segundo a recomendação agrônômica oficial do Estado do Paraná (IAPAR, 2003).

$$NC = CTC \times \frac{Ve - Va}{100} = 9,35 \text{ cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3} \times \frac{70\% - 52,94\%}{100} = 1,6 \text{ t ST} \cdot \text{ha}^{-1}$$

d) Determinação da dose de aplicação:

$$\text{Dose de aplicação} = \frac{NC \times 100}{PRNT \text{ ou } PN} = \frac{1,6 \text{ t ST} \cdot \text{ha}^{-1} \times 100}{45,6\%} = 3,51 \text{ t ST} \cdot \text{ha}^{-1}$$

Critério III - Para biossólido Classe 2 (Cu = 4.305 mg·kg⁻¹), a dose de aplicação não deverá exceder o valor mais limitante entre taxa máxima anual (Q) de 75 kg·ha⁻¹·ano⁻¹ e carga máxima acumulada (Q') de 1.500 kg·ha⁻¹.

e) Determinação da dose de aplicação considerando a taxa máxima anual (Q):

$$\text{Dose de aplicação} = \frac{Q - K}{PT} \times t \times 1.000 = \frac{(75 - 0) \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}}{4.305 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}} \times 1 \text{ ano} \times 1.000 = 17,42 \text{ t ST} \cdot \text{ha}^{-1}$$

f) Dose de aplicação considerando a carga máxima acumulada (Q):

$$\text{Dose de aplicação} = \frac{Q' - J}{T} \times 1.000 = \frac{(1.500 - 0) \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}}{4.305 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}} \times 1.000 = 348,43 \text{ t ST} \cdot \text{ha}^{-1}$$

Em que: K - taxa anual aplicada equivalente a soma da carga aplicada da substância química (kg·ha⁻¹·ano⁻¹) nos últimos 12 meses; T - teor da substância química no biossólido (mg·kg⁻¹) a ser aplicado; t - 1 ano; J - soma das cargas aplicadas da substância química (kg·ha⁻¹) desde a primeira aplicação na área.

Observação final:

- Como resultado, em atendimento aos critérios estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 498/2020, da dose de aplicação do biossólido deverá ser de 3,51 t ST·ha⁻¹, sendo o critério de correção de acidez de solo o fator limitante da dose.

5. PERSPECTIVAS DE USO AGRÍCOLA DE BIOSSÓLIDO NO BRASIL

Desde a concepção da ideia de uso do lodo de esgoto até a aplicação do biossólido no solo, diversos aspectos devem ser avaliados considerando as particularidades locais. A seguir estão listados os principais desafios que, se não considerados

e contornados, podem dificultar ou mesmo inviabilizar o uso agrícola de biossólido. Os desafios aqui reportados se tornam ainda mais latentes no caso de geradores sem experiência prévia com o uso agrícola de biossólido e que, geralmente, lançam mão de aterros sanitários para disposição final do lodo, tendo em vista a maior simplicidade de gerenciamento desta

forma de destinação, se comparada ao uso agrícola. Cabe destacar que os aspectos indicados a seguir não são exaustivos, podendo-se citar outros como acessibilidade a laboratórios para caracterização do bio sólido, logística de transporte, licenciamento, capacitação de profissionais que atuam no processo, entre outros. Além dos desafios, são apresentados possíveis propulsores para a disseminação desta prática no País.

5.1. Principais desafios

5.1.1 Infraestrutura

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2010), a disposição em aterro sanitário é o principal destino (37%) do lodo de esgoto gerado no Brasil. Dessa forma, presume-se que grande parte das ETEs em operação não dispõe de infraestrutura para processamento do lodo de esgoto visando seu uso agrícola. A implantação de unidades de higienização e de armazenamento de bio sólido pode ocorrer na área da própria ETE ou em uma unidade de gerenciamento de lodo (UGL) externa (esta, em geral, recebe a contribuição de lodo oriundo de um conjunto de ETEs ou de sistemas de tratamento de esgoto individuais). A configuração destas unidades é influenciada por fatores como a técnica de higienização, a frequência de destinação, entre outros. Por exemplo, para uma mesma quantidade de bio sólido, a área requerida para compostagem é consideravelmente superior à demandada para estabilização alcalina; no caso de destinação por lotes, o requisito de área para armazenamento é superior, se comparado à destinação em fluxo contínuo. Ainda, é possível que o lodo seja processado por terceiros, em unidades especializadas em beneficiamento de resíduos, dispensando a implantação de unidades por parte do gerador de lodo.

5.1.2 Características do setor agrícola

O planejamento é essencial no processo e deve considerar algumas características inerentes ao setor agrícola. O setor é dinâmico e muitos fatores podem afetar a gestão do processo. Incertezas quanto a fatores climáticos e oscilações de preços de produtos e insumos podem alterar as tomadas de decisões do agricultor e afetar a destinação do bio sólido em áreas previamente cadastradas.

Em regiões como as do Sul do Brasil, a demanda agrícola é concentrada em duas safras por ano (safras de verão e

inverno), e esse fator deve ser considerado no planejamento de formação de lotes e de logística de transporte e distribuição. Outros fatores, como o elevado número de dias com chuvas, concentradas em um período, podem impedir o descarregamento do bio sólido nas áreas agrícolas, atrasando etapas.

5.1.3 Articulação junto aos produtores rurais

A articulação junto a produtores rurais deve ser considerada ainda na fase de concepção da ideia de uso de lodo de esgoto, a fim de assegurar que haverá demanda por bio sólido. Nesse processo, destaca-se a importância do envolvimento de representantes das empresas de saneamento e de parceiros de reconhecida atuação no meio rural (pesquisa e extensão rural, sindicatos). Em geral, o nível de informação sobre o que é lodo de esgoto e, principalmente, bio sólido, varia consideravelmente entre produtores rurais, desde desconhecimento total até detalhamento relacionado à presença de patógenos, nutrientes e outros. Este é um importante aspecto a ser considerado, pois influencia a percepção, o engajamento e a propensão à aplicação do bio sólido nas áreas de cultivo. Em situações em que não há conhecimento sólido sobre o tema, a articulação junto aos produtores pode demandar mais envolvimento entre as partes, a fim de superar eventuais barreiras ao uso do bio sólido. Este trabalho pode ser desenvolvido de forma individualizada ou coletiva, a depender do modelo de destinação de bio sólido a ser adotado (centralizado em poucos receptores ou disperso entre vários), da forma de organização dos produtores, das características dos cultivos, dentre outras particularidades locais.

Para casos em que o conhecimento acerca do uso do bio sólido já se encontra bem estabelecido e difundido, a articulação é mais simples. No Paraná, por exemplo, que realiza a destinação de bio sólido para uso agrícola desde 2002, o lodo de esgoto é bem aceito pelos agricultores, sendo grande a procura pelo material e seu uso vem se expandindo para o interior do estado, que é essencialmente agrícola, com grande potencial para o uso do material (BITTENCOURT, 2014; BORGES, 2016; KNOPIK *et al.*, 2018).

5.1.4 Aceitação pública

Dentre outras partes envolvidas no processo, destacam-se a comunidade inserida na região de gerenciamento e aplicação do bio sólido, bem como os consumidores dos produtos

cultivados com este insumo. Quanto ao primeiro grupo, alguns dos pontos de atenção referem-se a eventuais maus odores nas etapas de produção e transporte do biossólido, além da possível associação à degradação ambiental, em função da destinação de um material que eventualmente estaria sendo disposto como rejeito em aterros sanitários. Em relação ao segundo grupo, a principal preocupação consiste na qualidade do produto cultivado com o biossólido. A depender do tipo de cultivo e destinação, o fato do biossólido ser um material derivado do tratamento de esgoto, pode causar repulsa e suscitar questionamentos dos consumidores, em especial quanto ao aspecto sanitário.

Nesse contexto, podem ser adotadas medidas estruturais, como para mitigação dos odores, e principalmente ações de sensibilização da comunidade da região ou município de aplicação. Existem diversas estratégias para sensibilização, porém a que promove maior contato e, em geral maior engajamento, é a realização de reuniões e visitas junto às comunidades. O principal objetivo destes encontros é divulgar informações sobre o uso agrícola do biossólido, esclarecer os cuidados e sanar dúvidas que possam surgir. A participação de representantes das instituições municipais de agricultura, saúde e meio ambiente nestes encontros pode contribuir nas discussões. Somadas à sensibilização, podem ser desenvolvidas ações de *marketing* para melhoria da imagem do produto e ampliação de sua inserção no mercado.

5.2 Possíveis indutores

Para além de iniciativas pontuais, a efetiva difusão de uso agrícola do biossólido, em escala nacional, perpassa por políticas públicas voltadas aos setores de saneamento e agricultura. Nesse sentido, maior restrição à disposição do lodo de esgoto em aterros sanitários pode representar um importante indutor ao uso agrícola, tendo em vista que outras opções de destinação (como processos térmicos, uso na construção civil) podem não ser factíveis no contexto nacional devido ao elevado nível de complexidade e custo. Certamente, estas restrições devem ocorrer em compasso com o equacionamento dos desafios mencionados anteriormente, sob o risco de agravar o já precário cenário de destinação de lodo de esgoto no País.

No que tange às políticas públicas para o setor agrícola, em especial no caso de pequenos agricultores, destaca-se a importância de se criar mecanismos de suporte para elaboração do projeto agrônomo, distribuição e aplicação do biossólido. Em alguns casos, já existem programas de apoio a pequenos produtores, como disponibilização de maquinário para preparo do solo e transporte de insumos, situações em que o uso do biossólido poderia ser mais rapidamente incorporado ao planejamento agrícola. Em termos comerciais, a disponibilização gratuita desse material pode representar uma das principais estratégias de difusão da prática.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os solos agricultáveis brasileiros, expostos às condições de clima tropical, são responsivos a adição de matéria orgânica. Este fato somado às grandes extensões cultivadas, cerca de 80 milhões de hectares, faz do Brasil o país com maior potencial do mundo para o uso do biossólido na agricultura. Não só pela capacidade de absorção destes materiais, mas, sobretudo pelo fato do País não poder se dar ao luxo de desprezá-los como fonte de matéria orgânica, macro e micronutrientes, por depender em grande parte da importação dos fertilizantes minerais aqui consumidos.

Ainda que tenhamos todo o esgoto tratado no Brasil, situação que poderá levar décadas para ser alcançada, é fato que a quantidade potencial de geração de biossólido será muito pequena frente as nossas extensas áreas cultivadas. Por outro lado, isto pode ensejar grandes oportunidades para sua valorização, entre elas a possibilidade de utilizá-los como matriz orgânica em formulações de fertilizantes organominerais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis.

Este trabalho faz parte da série de publicações do INCT ETEs Sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- AUSTRALIAN e NEW ZEALAND BIOSOLIDS PARTNERSHIP. *Australian Biosolids Statistics*. Disponível em: <https://www.biosolids.com.au/guidelines/australian-biosolids-statistics/>. Acesso em: 17 de setembro de 2020.
- BITTENCOURT, S. Agricultural Use of Sewage Sludge in Paraná State, Brazil: A Decade of National Regulation. *Recycling*, v. 3, n. 4: 53, 2018.
- BITTENCOURT, S. *Gestão do processo de uso agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná: Aplicabilidade da Resolução Conama 375/06*. 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- BORGES, S. F. *Estratégias de promoção da sustentabilidade para a gestão do resíduo sólido "lodo de esgotos": um estudo de caso da Sanepar (Companhia de Saneamento do Paraná)*. 2016. 67 p. Planejamento de Pesquisa (Bacharelado em Administração). Faculdade CNEC Campo Largo, Campo Largo, 2016.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). *Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas*. Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: ANA, 2017. 88 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa nº 7, de 04 de abril de 2016. Altera a Instrução Normativa nº 27, de 5 de junho de 2006 que estabelece os limites máximos de contaminantes e agentes fitotóxicos patogênicos ao homem, animais e plantas a serem atendidos nos fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes. Brasília, DF, 2016.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biofertilizante em solos, e dá outras providências. Brasília, DF, 2020.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Brasília, DF, 2006.
- BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei Federal nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, 2010.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Norma Técnica P4.230 - Aplicação de lodos sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - critérios para projeto e operação: manual técnico*. 1999. 33 p.
- DALPISOL, M.; SERRAT, B. M.; MOTTA, A. C. V.; POGGERE, G. C.; BITTENCOURT, S.; BARBOSA, J. Z. Zinc, copper and manganese availability in soils treated with alkaline sewage sludge from Paraná state (Brazil). *Ciência e Agrotecnologia*, v. 41, n. 1, p. 81-93, 2017.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Os solos do Brasil*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil>. Acesso em: 19 de setembro de 2020.
- EUROSTAT. *Sewage sludge production and disposal*. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/product?code=env_ww_spd. Acesso em: 17 de setembro de 2020.
- IAPAR. Instituto Agrônomo do Paraná. *Sugestão de adubação e calagem para culturas de interesse econômico no Estado do Paraná*. Londrina, Brasil: IAPAR, 2003. 30 p.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Cidades - População estimada Brasil*. Rio de Janeiro, Brasil: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Diretoria de Pesquisas. Coordenação de População e Indicadores Sociais. 2020a.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA). *Levantamento Sistemático da Produção Agrícola*. 2020b. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618>. Acesso em: 19 de setembro de 2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - 2008*. Rio de Janeiro, Brasil: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Diretoria de Pesquisas. Coordenação de População e Indicadores Sociais. 2010.
- KNOPIK, M. A.; RUFINE, R.; BITTENCOURT, S.; GASPAROTTO, F. Aporte de nutrientes em solos tratados com lodo de esgoto: estudo de caso da região de Campo Mourão, Noroeste do Paraná. *Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento*, v. 7, n. 3, p. 379-389, 2018.
- MARQUES J. J.; SCHULZE, D. G.; CURI, N.; MERTZMAN, S. A. Trace element geochemistry in Brazilian Cerrado soils. *Geoderma*, v. 121, p. 31-43, 2004.

ONU. Organização das Nações Unidas no Brasil. *Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Preâmbulo. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>. Acesso em: 20 de maio de 2019.

PARANÁ. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Resolução SEMA nº. 21, de 30 de junho de 2009. Dispõe sobre licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e dá outras providências, para empreendimentos de saneamento. Curitiba, PR, 2009.

RONQUIM, C. C. *Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais*. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8. Campinas, Brasil: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 26 p.

SANEPAR. Companhia de Saneamento do Paraná. *Sistema Normativo da Sanepar. IT/OPE/1899 - Gestão de Efluentes Não Domésticos*. Curitiba: Sanepar, 2013.

SBCS. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. *Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2004. 10th ed. Porto Alegre, Brasil: SBCS, 2004. 400 p.

SILVA, A. L.; LOURENÇO, C. DE L.; VILLAS BOAS, R. L.; TÁPIA, M.; MATEUS, C. de M. D. Nova tecnologia com função mista para secagem e compostagem de lodo de tratamento de esgoto e atendimento aos parâmetros legais de disposição agrícola. In: *29º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2017, São Paulo, Brasil. *Proceedings*. São Paulo, Brasil: ABES, 2017.

SILVA, H. WHO. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater in agriculture and aquaculture. In: Leblanc, R. Laughton, P. Rajesh, T. *Wastewater Biosolids Sustainability – technical, managerial and public synergy*. Moncton, Canada: Greater Moncton Sewerage Commission, Commission d'épuration des eaux usées du Grand Moncton, 2007.

SOUZA, M. L. P.; RIBEIRO A. N.; ANDREOLI C. V.; SOUZA L. C. P.; BITTENCOURT, S. Aptidão das terras do Estado do Paraná para disposição final de lodo de esgoto. *Revista DAE*, v. 177, p. 20-29, 2008.

US EPA. United States Environmental Protection Agency. *Basic Information about Biosolids*. Disponível em: <https://www.epa.gov/biosolids/basic-information-about-biosolids>. Acesso em: 16 de setembro de 2020.

VENDRAME, P. R. S.; BRITO, O. R.; QUANTIN, C.; BECQUER, T. Disponibilidade de cobre, ferro, manganês e zinco em solos sob pastagens na Região do Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 42, n. 6, 2007.

von SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: Andreoli, C. V.; von Sperling, M.; Fernandes, F. (Org.). *Lodo de esgoto: tratamento e disposição final*. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 484 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuais, v. 6)

YAMADA, T. Deficiências de micronutrientes, ocorrência, detecção e correção: o sucesso da experiência brasileira. Encarte Técnico. *Informações Agrônomicas*, n. 105, p. 1-12, 2004.

Parte A: Higienização e uso de lodo de esgoto no solo

Nota Técnica 7 – Uso de biossólido para recuperação de áreas degradadas

Part A: Sanitization and use of sewage sludge in soil
Technical Note 7 - Use of biosolids to recover degraded areas

**Lucas de Almeida Chamhum-Silva^{1*}, Jonathas Batista Gonçalves Silva²,
Leiliane Saraiva Oliveira³, Marcio Niemeyer Borges⁴, Tiago Geraldo de Lima⁵,
Simone Bittencourt⁶, Antônio Teixeira de Matos^{7(t)}**

RESUMO

A matéria orgânica (MO) é fundamental no processo de recuperação de áreas degradadas (RAD), notadamente quanto às propriedades químicas e físicas do solo. O biossólido obtido a partir do lodo de esgoto é uma importante fonte de MO e nutrientes. Nesta nota técnica é discutida a influência de ambos na RAD, assim como o potencial de utilização do biossólido para este fim. A MO atua como reservatório de nutrientes, os quais são liberados gradualmente, melhora a capacidade de troca catiônica do solo, e pode complexar ou quelatar metais potencialmente tóxicos às plantas. Destaca-se ainda a sua influência sobre a redução da massa específica do solo, formação de micro e macroagregados, melhoria da estabilidade do solo, e aumento da superfície específica. Os aspectos práticos do uso de biossólido em RAD são discutidos à luz da Resolução CONAMA nº. 498/2020, principalmente sobre os critérios de cálculo das doses de aplicação, bem como são apresentados dois estudos de caso.

Palavras-chave: resíduo de saneamento; lodo de esgoto; matéria orgânica; economia circular.

ABSTRACT

Organic matter (OM) is fundamental in the recovery of degraded areas (RDA), particularly when concerning the soils' chemical and physical properties. The biosolid obtained from sewage sludge is an important source of OM and nutrients. This technical note discusses the influence of both on RDA, as well as the potential for using biosolids for that purpose. OM acts as a reservoir of nutrients, which are gradually released; it improves the cation exchange capacity of the soil; and it can complex or chelate metals potentially toxic to plants. It is also highlighted its influence on the reduction of the specific mass of the soil, the formation of micro and macro aggregates, the improvement of soil stability, and the increase of soil specific surface. The practical aspects of biosolids use in RDA are discussed in the light of CONAMA Resolution 498/2020, mainly about the criteria for calculating the application doses. Two case studies are also presented.

Keywords: sanitation waste; sewage sludge; organic matter; circular economy.

¹Engenheiro Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

²Engenheiro Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), Doutor Engenharia Agrícola pela UFV. Professor Associado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFV.

³Engenheira Florestal pela Universidade de Brasília (UNB), Mestre em Ciências Florestais pela UNB. Profissional da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB).

⁴Engenheiro Florestal pela UNB, Pós-graduação em Geoprocessamento Aplicado a Gestão Ambiental pela UNB. Profissional da CAESB.

⁵Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal de Lavras (UFLA), Gestor de Agronegócios pela Universidade de Brasília pela UNB, Mestre em Fitotecnia pela UFLA. Profissional da CAESB.

⁶Engenheira Agrônoma, Mestre em Agronomia e Doutora em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Profissional da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). Professora do Curso de Gestão Ambiental da Faculdade Fael.

⁷Engenheiro Agrícola pela UFV, Doutor em Solos e Nutrição de Plantas pela UFV. Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

(t) in memoriam

(*) **Endereço para correspondência:** Avenida Antônio Carlos 6627 - Universidade Federal de Minas Gerais - Escola de Engenharia - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Bloco 1. Belo Horizonte, MG. CEP: 31270-901. e-mail: lucas.almeida@engenharia.ufjf.br

1. INTRODUÇÃO

As áreas degradadas podem ser conceituadas como aquelas que, após sofrer um forte impacto ambiental, perdem a capacidade de retornar naturalmente ao seu estado original ou a um equilíbrio dinâmico (resiliência) (MARTINS, 2013; IBAMA, 2011). Ainda segundo Martins (2013), as áreas degradadas também podem ser caracterizadas como aquelas que perderam o horizonte superficial do solo, o que ocasiona a perda de nutrientes, de matéria orgânica e do banco de sementes, a ausência de atividade biológica e a alteração das propriedades físicas, fatores que favorecem a atuação dos processos erosivos e a acidificação do substrato.

No Brasil, dados do Ministério do Meio Ambiente (MMA) indicam que existe mais de 140 milhões de hectares de áreas degradadas, o que corresponde a aproximadamente 16% do território brasileiro (SPITZCOVSKY, 2012). Os principais agentes responsáveis pela degradação do solo são as atividades agrossilvipastoris (quando mal manejadas), a mineração (p. ex.: remoção de horizontes superficiais, formação de pilhas de estéreis), a abertura de rodovias e ferrovias (p. ex.: terraplenagem, áreas de empréstimo e bota fora), o avanço da urbanização, dentre outros. Como resultados, podem ser citados diversos impactos ambientais, como perda de fertilidade do solo e consequente redução da capacidade de produção, assoreamento dos cursos d'água, espécies da fauna e flora ameaçadas de extinção e mudanças climáticas (MARTINS, 2013), que acabam provocando outros graves problemas de ordem econômica e social. Como consequência tem-se um prejuízo anual próximo de US\$ 4,24 bilhões associados aos custos de reposição de corretivos e fertilizantes na recuperação da fertilidade dos solos, tratamento de água, dragagem de reservatórios de água, manutenção das estradas, dentre outros (PRUSKI, 2009).

Diante deste cenário, tecnologias vêm sendo desenvolvidas com vistas a recuperar áreas degradadas, podendo ser divididas em técnicas vegetativas, mecânicas e edáfica. As técnicas vegetativas consistem na implantação e manejo de cobertura vegetal a fim de proteger o solo contra a ação direta da precipitação, enquanto as mecânicas referem-se aos diferentes métodos de reconformação topográfica, visando a estabilização do terreno e condições favoráveis para desenvolvimento da vegetação. Já as técnicas edáficas são aquelas que visam melhorar as condições de estrutura e fertilidade

do solo e, consequentemente, manter sua superfície com maior cobertura vegetal (PRUSKI, 2009). Entre as técnicas edáficas empregadas para o controle do processo erosivo e recuperação de áreas degradadas destacam-se: adubação verde, adubação química, calagem e incorporação de material orgânico no solo.

A incorporação de matéria orgânica nos solos tem sido amplamente recomendada, podendo ocorrer por meio da utilização de esterco de origem animal, cama de aves, resíduos da compostagem, cobertura vegetal morta (notadamente de leguminosas), além de bio sólido, sendo este último o objeto de interesse da presente nota técnica (NT). O bio sólido é um material oriundo do beneficiamento do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto (ETEs), cujas características químicas e microbiológicas atendem aos critérios estabelecidos na Resolução nº 498/2020, do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), o que garante seu potencial para uso em solos (BRASIL, 2020). A NT 2 desta coletânea aborda os principais aspectos legais referentes ao uso de bio sólido em solo (BITTENCOURT *et al.*, 2022).

A composição do bio sólido pode variar em função das características do esgoto, do fluxograma de tratamento do esgoto e do próprio bio sólido (ANDREOLI *et al.*, 2014). No entanto, de forma geral, é um material com elevados teores de matéria orgânica e nutrientes, podendo ser considerado como um condicionador do solo e não apenas um fertilizante (MATOS e MATOS, 2017). Ademais, o lodo de esgoto é gerado continuamente nas ETEs, de tal sorte que a fonte da principal matéria-prima para geração do bio sólido é, em muitos casos, perene (em ETEs com remoção frequente de lodo). Além dos benefícios ao solo e às plantas, a aplicação de bio sólido na recuperação de áreas degradadas representa uma alternativa para o aproveitamento dos recursos presentes no lodo, em detrimento de técnicas que inviabilizam o uso desse subproduto do tratamento de esgoto (p. ex.: disposição final em aterros sanitários).

Diante do exposto, objetiva-se com esta NT discutir sobre a influência da matéria orgânica e nutrientes na recuperação de áreas degradadas, os principais aspectos a serem observados quanto ao uso do bio sólido para tal finalidade, bem como apresentar algumas experiências brasileiras relacionadas a esta temática.

2. IMPORTÂNCIA DA MATÉRIA ORGÂNICA E NUTRIENTES PARA A RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

A incorporação de material orgânico no solo pode ser adotada como uma técnica na recuperação de áreas degradadas, com vistas a proporcionar melhorias nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. Em que pese os benefícios em relação à biota do solo, neste tópico é discutido especificamente os principais efeitos potenciais da incorporação de material orgânico nas propriedades químicas e físicas do solo.

2.1. Características químicas

As principais características químicas do solo influenciadas pela matéria orgânica são: a retenção e atuação como reservatório de nutrientes, a capacidade de troca catiônica (CTC) e a complexação e quelação de metais. A melhoria das características químicas está relacionada à capacidade de estabelecimento e desenvolvimento de plantas e à atividade microbiana do solo.

2.1.1. Fonte de nutrientes

Embora a composição química da matéria orgânica varie de acordo com a fonte do material em questão, de forma geral, é rica em macronutrientes, como o nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S) e micronutrientes. No entanto, grande parte desses nutrientes é disponibilizada no solo apenas com a conversão do material orgânico em matéria mineralizada. Essa conversão,

denominada mineralização da matéria orgânica, ocorre de forma gradativa e envolve uma série de fatores (tipo de material, solo, clima etc.), de tal forma que material orgânico pode ser entendido como um reservatório de nutrientes, que fazem parte da sua constituição química e que são liberados gradualmente. Segundo Moreira e Siqueira (2006), a matéria orgânica, por possuir caráter anfótero¹, atua como reservatório tanto de cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} e micronutrientes), quanto de ânions (HPO_4^{2-} e SO_4^{2-}).

Na **Tabela 1** são apresentados os resultados da incorporação de biossólido em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico em Itatinga – SP. Observa-se o efeito crescente dos teores de nutrientes no solo quando se aumenta a incorporação de biossólido (GUEDES *et al.*, 2006).

2.1.2. Capacidade de troca catiônica

A capacidade de troca catiônica (CTC) é uma das propriedades químicas mais importantes do solo, pois é responsável pela retenção de cátions nutrientes das plantas, tais como cálcio, magnésio e potássio, os quais ficam adsorvidos nos sítios de carga negativa dos colóides minerais e orgânicos do solo (MATOS e MATOS, 2017). Há muito tempo se reconhece a importância da matéria orgânica na CTC dos solos, contribuindo com 20 a 90% da CTC das camadas superficiais de solos minerais e, praticamente, com toda a CTC de solos orgânicos (SILVA e MENDONÇA, 2007). Na **Tabela 2** apresenta-se a CTC de constituintes da fração argila do solo e da matéria orgânica.

Tabela 1 – Efeito da incorporação de biossólido sobre os teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e soma de bases (K+Ca+Mg+Na) em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico.

Tratamento	Fósforo (mg·dm ⁻³)	Potássio (mmol _c ·dm ⁻³)	Cálcio (mmol _c ·dm ⁻³)	Magnésio (mmol _c ·dm ⁻³)	Soma de Bases (mmol _c ·dm ⁻³)
T1 - Solo natural	4,0	0,6	0,7	0,2	1,0
T2 - Adubação mineral	18,6	0,6	1,1	0,4	1,5
T3 - 10 t·ha ⁻¹ de biossólido + K mineral	7,6	0,7	1,8	0,2	2,1
T4 - 20 t·ha ⁻¹ de biossólido + K mineral	10,1	0,4	2,7	0,2	3,0
T5 - 40 t·ha ⁻¹ de biossólido + K mineral	14,3	0,3	4,3	0,2	4,6
T6 - 80 t·ha ⁻¹ de biossólido	51,6	0,5	10,1	0,3	10,5
T7 - 160 t·ha ⁻¹ de biossólido	73,6	0,4	10,5	0,4	10,9

Fonte: adaptado de Guedes *et al.* (2006).

¹Substância capaz de reagir em comportamento ácido ou básico.

A incorporação de material orgânico em solos degradados é uma ação importante para o aumento da CTC do solo, pois a CTC do húmus varia de 200 a 400 $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$, enquanto a da caulinita (mineral predominante nos solos brasileiros) varia de 3 a 15 $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ (MATOS e MATOS, 2017). Na **Tabela 3** apresenta-se o efeito da incorporação da matéria orgânica sobre a CTC de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. Observa-se o incremento da CTC quando aplicado doses maiores de biofóssido.

2.1.3. Complexação e quelação de metais

A aplicação de matéria orgânica aos solos tem sido recomendada como forma de controlar a toxicidade proporcionada por certos elementos químicos encontrados em quantidades acima do normal (MATOS e MATOS, 2017). Segundo os mesmos autores, o ferro (Fe), o alumínio (Al) e o manganês (Mn) têm sido apontados como os elementos tóxicos mais comuns para as plantas nos solos brasileiros. As formas como esses elementos se encontram no solo são variadas, podendo estar mais ou menos disponíveis a depender das dinâmicas das reações a que são submetidos no solo. Nesse contexto, destaca-se a capacidade da matéria orgânica em reagir com elementos tóxicos tornando-os menos disponíveis, seja através da fixação, complexação ou quelação

Tabela 2 - Capacidade catiônica e superfície específica de constituintes da fração argila do solo e da matéria orgânica.

Partícula	CTC ($\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$)	Superfície específica ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)*
Caulinita	3 a 15	7 a 30
Vermiculita	100 a 150	500 a 800
Montmorilonita	80 a 150	600 a 800
Matéria orgânica	200 a 400	800 a 900

Nota: *Ver item 2.2.3.

Fonte: Adaptado de Grim e Güven (1978) e Matos (2006).

Tabela 3 - Capacidade de Troca Catiônica (CTC) em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico após a incorporação crescente de biofóssido.

Tratamento	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
CTC ($\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-3}$)	6,0	5,6	4,9	4,7	5,4	11,3	11,7

Notas: T1 - Solo natural; T2 - Solo com adubação mineral; T3 - Solo com 10 tha^{-1} de biofóssido + K mineral; T4 - Solo com 20 tha^{-1} de biofóssido + K mineral; T5 - Solo com 40 tha^{-1} de biofóssido + K mineral; T6 - Solo com 80 tha^{-1} de biofóssido; T7 - Solo com 160 tha^{-1} de biofóssido.

Fonte: adaptado de Guedes et al. (2006).

A formação de complexos orgânicos é decorrente da interação ou ligação entre um doador de elétrons (ligante – material orgânico) e um cátion (MATOS e MATOS, 2017). A formação de quelatos pode ser descrita como uma reação de equilíbrio entre um íon metálico e um agente complexante, no caso orgânico, caracterizada por mais de uma ligação (p. ex.: eletrostática ou covalente), resultando na formação de uma estrutura de anel, estando o metal incorporado à estrutura.

Na **Tabela 4** apresenta-se o resultado da incorporação de material orgânico oriundo da bovinocultura sobre os teores dos metais Fe e Al no solo.

2.2. Características físicas

As principais características físicas do solo influenciadas pela matéria orgânica são massa específica, superfície específica, estrutura e estabilidade dos agregados, características estas que influenciam na aeração, drenagem, retenção de água e fixação das raízes. Segundo Moreira e Siqueira (2006), a melhoria das propriedades físicas do solo reduz sua suscetibilidade à erosão e, assim, indiretamente os danos ambientais que essa causa, como a degradação do solo, a poluição e o assoreamento de mananciais hídricos.

2.2.1. Massa específica

A massa específica é um indicador do grau de compactação do solo, sendo que quanto mais compacto, maior a limitação para aprofundamento das raízes. A matéria orgânica reduz a massa específica do solo direta e indiretamente. A redução direta é devido à adição de um material ao solo de massa específica menor, entre 0,2 a 0,4 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (MATOS, 2006). O efeito indireto, que pode ser observado em médio prazo, é devido à estruturação do solo, como resultado da participação da matéria orgânica como eficiente agente cimentante, capaz de consolidar a união das partículas primárias (areia, silte e argila), gerando agregados e com eles proporcionando o aumento da porosidade do solo.

Tabela 4 - Valores de Fe e Al presentes no solo, antes e após a incorporação de esterco curtido da bovinocultura.

Metais	Antes da aplicação	Após aplicação
Fe ($\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$)	63,9	47,6
Al ($\text{mmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$)	6,53	3,24

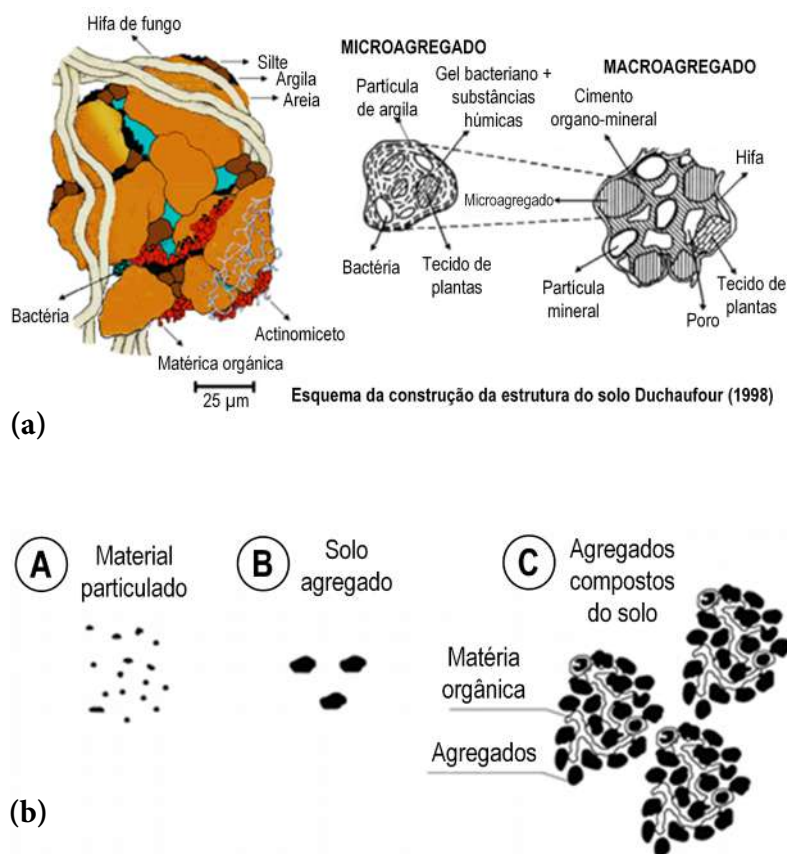
Fonte: Caetano e Carvalho (2006).

2.2.2. Agregação

A matéria orgânica incorporada age como um agente cimentante na formação de micro e macroagregados a partir das partículas do solo. Na formação dos microagregados, as partículas húmicas da matéria orgânica podem se ligar aos colóides minerais do solo por meio de dois mecanismos principais: ligação entre a carga elétrica do colóide orgânico e zonas positivas nos minerais de argila (p. ex.: entre as cargas positivas dos óxidos de Fe e Al e cargas negativas dos colóides orgânicos) e ligações intermediadas por cátions (p. ex.: cátions, como Al, Fe, Ca, Mg, fazem uma ponte de ligação entre as cargas negativas dos colóides minerais e as dos orgânicos) (MATOS e MATOS, 2017).

Já na formação dos macroagregados, a matéria orgânica particulada, hifas de fungos e raízes de plantas podem

formar um emaranhado de microagregados. A morte das raízes e as hifas que crescem dentro e através dos macroagregados produzem agentes ligantes bioquímicos capazes de estabilizar os macroagregados do solo. Entretanto, essas frações estão sujeitas à decomposição microbiana; assim, a agregação é um processo dinâmico no solo, uma vez que a atividade microbiana pode atuar na produção de agentes ligantes às partículas, mas também desestabilizar por meio da decomposição (SILVA e MENDONÇA, 2007). O aporte contínuo de material orgânico é essencial para que esse balanço seja positivo. Por isso, sistemas que visam a manutenção e o aumento da matéria orgânica no solo geralmente estão ligados a uma melhoria de agregação do solo. Na **Figura 1** apresenta-se o modelo de estruturação do solo e o papel da matéria orgânica na formação dos micro e macroagregados.



Fonte: Adaptado de Busato *et al.* (2008); Lepsch (2010).

Figura 1 - (a) Modelo de estruturação do solo e o papel da matéria orgânica; (b) esquema ilustrando a formação de agregados do solo a partir de partículas unitárias: A. partículas unitárias do solo (areia, silte e argila), B. microagregados, C. conjunto de macroagregados em solo

A matéria orgânica incorporada no solo possui também um importante papel na estabilização dos agregados do solo. Na **Figura 2** apresenta-se o efeito da incorporação da matéria orgânica no solo sobre a formação de agregados e a estabilidade deles. Observa-se que, à medida que o teor de material orgânico aumenta no solo, o percentual de agregados maiores aumenta e o de agregados menores diminui. Também se observa que o índice de estabilidade dos agregados aumenta com o aumento do teor de carbono orgânico no solo.

Solos bem agregados, com boa relação entre macro e microagregados, favorecem a infiltração e percolação da água até os lençóis freáticos, fixação do sistema radicular das culturas e redução do tombamento delas, troca

de gases, dentre outros. Estes benefícios advindos com a incorporação da matéria orgânica no solo são fundamentais na recuperação de áreas degradadas.

2.2.3. Superfície específica

A superfície específica do solo é uma importante característica, pois está associada a reações químicas e físicas, tais como plasticidade/pegajosidade, capacidade de troca catiônica (CTC) e capacidade de retenção de água. Essas reações ocorrem na superfície das partículas e, dessa forma, a reatividade de um solo torna-se proporcional à grandeza de sua superfície específica.

A incorporação de matéria orgânica em áreas degradadas aumenta a superfície específica do solo, pois a sua

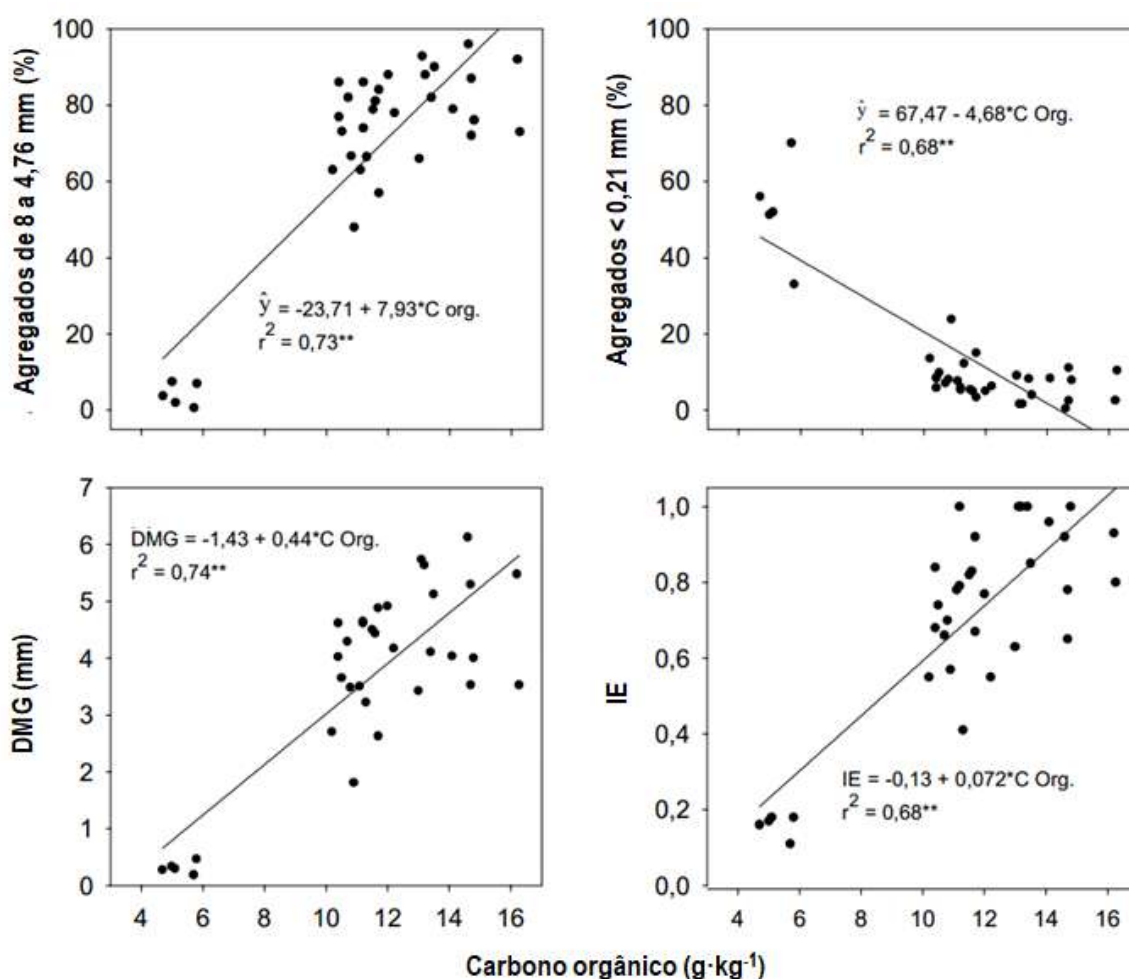


Figura 2 - Relação entre teor de carbono orgânico do solo e: (a) agregados da classe de 8,00 a 4,76 mm; (b) agregados menores que 0,21 mm; (c) diâmetro médio geométrico padrão (DMG); (d) índice de estabilidade de agregados (IE).

superfície é maior que a da caulinita, mineral em abundância nos solos brasileiros (Tabela 2). Logo, isso faz com que a adoção desta prática se torne fundamental na recuperação de áreas degradadas.

3. UTILIZAÇÃO DE BIOSSÓLIDO NA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

A recuperação de área degradada é regulamentada por legislações específicas, pressupondo a elaboração, análise, aprovação e acompanhamento da execução de Projeto de Recuperação de Área Degradada ou Perturbada (PRAD). Além dos procedimentos estabelecidos nas legislações atinentes ao PRAD, quando do uso de biossólido para tal finalidade, deve-se observar, também, a Resolução CONAMA nº 498/2020 (BRASIL, 2020). Segundo esta Resolução, tanto o biossólido Classe A ou B (relacionados ao padrão de qualidade microbiológica), quanto o Classe 1 ou 2 (relacionados ao padrão de substâncias químicas) pode ser utilizado

para a recuperação de áreas degradadas. Apesar das amplas possibilidades, a aplicação do biossólido em solos deve ser realizada conforme o PRAD, elaborado por profissional habilitado. Dentre os aspectos a serem observados no projeto, destacam-se: origem e características do biossólido; identificação, localização e características da área de aplicação (incluindo parâmetros edáficos); avaliação de possíveis restrições locais; dose e forma de aplicação.

Em relação à localização e características da área de aplicação, cumpre ressaltar que em áreas degradadas localizadas em Unidades de Conservação somente poderá ser utilizado biossólido Classe A1. Ademais, nos casos de uso de biossólido Classe B não é permitido contato humano direto com o material, devendo-se dispor de tratores e implementos agrícolas para sua incorporação logo após a aplicação. No que se refere à dose de aplicação, a Resolução CONAMA nº 498/2020 estabelece os três critérios de cálculo apresentados na **Tabela 5** (BRASIL, 2020).

Tabela 5 – Critérios para cálculo da dose de aplicação de biossólido em áreas degradadas.

Critério/Equações	Observações
Critério I: tem como principal parâmetro de cálculo o teor de matéria orgânica que se deseja alcançar no solo degradado. Para biossólido Classe 1 ou 2, a dose de aplicação não deverá exceder o quociente entre a dose de matéria orgânica a ser incorporada ao solo (MO_{inc}), via aplicação do biossólido, e o teor de matéria orgânica no biossólido ($MO_{biossólido}$) (Equações 1 e 2). $Dose\ de\ aplicação\ (t \cdot ha^{-1}\ de\ ST) = \frac{MO_{inc}}{MO_{biossólido}} \quad (1)$ $MO_{inc} = (MO_f - MO_i) \times V_s \times d_s \quad (2)$	MO_i: teor de matéria orgânica no solo ($dag \cdot kg^{-1}$) MO_f: teor de matéria orgânica final ou desejada para o solo ($dag \cdot kg^{-1}$). Esse valor deve ser limitado a 3% de MO no volume de solo da camada arável $MO_{biossólido}$: teor de matéria orgânica no biossólido ($dag \cdot kg^{-1}$) V_s: volume de solo em 1 hectare, considerando a profundidade de incorporação do biossólido ou da camada arável (m^3) d_s: densidade do solo ($g \cdot cm^{-3}$)
Critério II: aplicável a biossólido tratado por processos alcalinos, considera a necessidade de correção de acidez do solo como parâmetro de cálculo, tendo em vista os elevados valores de pH do biossólido obtido a partir desta técnica de tratamento. Para biossólido Classe 1 ou 2 tratado por processo alcalino, a dose de aplicação não deverá exceder o quociente entre a necessidade de correção de acidez de solo (NC) da área na qual o biossólido será aplicado e o poder relativo de neutralização total (PRNT) ou poder de neutralização (PN) do biossólido (Equação 3). $Dose\ de\ aplicação\ (t \cdot ha^{-1}\ de\ ST) = \frac{NC \times 100}{PRNT\ ou\ PN} \quad (3)$	NC: necessidade de correção de acidez de solo, calculada segundo a recomendação agronômica oficial do Estado PRNT: poder relativo de neutralização total do biossólido PN: poder de neutralização do biossólido
Critério III: aplicável a biossólido Classe 2, uma vez que esse tipo de biossólido apresenta maiores teores de substâncias químicas, comparativamente ao Classe 1. Para biossólido Classe 2, a quantidade de substâncias químicas aportadas via biossólido não deve exceder a carga máxima acumulada em solos (Tabela 6) e, caso algum parâmetro seja excedido, a dose deve ser recalculada conforme a Equação 4. $Dose\ de\ aplicação\ (t \cdot ha^{-1}\ de\ ST) = \frac{M \times 1000}{T} \quad (4)$	M: carga máxima acumulada de poluente ($kg \cdot ha^{-1}$) T: teor de substância química no biossólido ($mg \cdot kg^{-1}$)

Fonte: Brasil (2020).

Na **Tabela 6** são indicados os valores máximos permitidos no bioossólido e as cargas máximas acumuladas em áreas degradadas para diferentes substâncias químicas.

Importante notar que a dose a ser considerada para aplicação deverá ser a menor dentre as calculadas, sob risco de se ultrapassar os limites definidos na Resolução e causar danos ao solo e às águas subterrâneas. Nos **Exemplos 1 e 2** são apresentados os cálculos da dose de aplicação de bioossólido considerando os critérios apresentados na Resolução CONAMA n° 498/2020 (BRASIL, 2020).

Tabela 6 - Valor máximo permitido no bioossólido e carga máxima acumulada em solo, referente ao uso de bioossólido Classe 2 em áreas degradadas.

Substâncias químicas	Valor máximo permitido no bioossólido (mg·kg ⁻¹ ST)	Carga máxima acumulada em solo de área degradada (kg·ha ⁻¹)
Arsênio	75	20
Bário	1.300	130
Cádmio	85	19
Cromo	3.000	1.500
Cobre	4.300	750
Chumbo	840	150
Mercúrio	57	8,5
Molibdênio	75	6,5
Níquel	420	210
Selênio	100	50
Zinco	7.500	1.400

Fonte: BRASIL (2020).

4. EXPERIÊNCIAS DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS COM A UTILIZAÇÃO DE BIOSSÓLIDO

As experiências, no contexto brasileiro, associadas ao uso de bioossólido na recuperação de áreas degradadas, ainda são pontuais. Sampaio *et al.* (2012) conduziram um experimento com bioossólido em área no interior de São Paulo, cuja degradação foi caracterizada pela remoção da camada superficial de solo e elevado grau de compactação (depósito de materiais pesados). Os autores avaliaram os efeitos de doses de aplicação de bioossólido (variando de 2,5 a 20 t·ha⁻¹) em relação a parâmetros físicos do solo, tais como estabilidade dos agregados, retenção de água, além de micro, macro e porosidade total.

Bonini (2015) avaliou o uso de bioossólido na recuperação de uma área degradada em função da remoção do horizonte superficial do solo para terraplenagem, no interior de São Paulo. Os autores monitoraram parâmetros químicos de qualidade do solo, considerando doses de aplicação de bioossólido de 30 e 60 t·ha⁻¹. Kitamura *et al.* (2020) também avaliaram os efeitos da aplicação de bioossólido nos atributos químicos do solo, assim como em relação a parâmetros biológicos e no estabelecimento de vegetação herbácea. A área estudada está localizada na região Carbonífera de Santa Catarina e foi degradada a partir de atividades de mineração de carvão, especificamente em razão do revolvimento e deposição de estéréis na superfície do solo. Nesse caso, os autores aplicaram doses de aplicação consideravelmente superiores de bioossólido, variando de 6,25 a 500 t·ha⁻¹.

Exemplo 1: Considerando uma área degradada por atividades de mineração de ferro, avaliar a possibilidade de uso de bioossólido Classe A1, obtido por meio de estabilização alcalina prolongada, como condicionador do solo dessa área. Nesse caso, a dose de aplicação deve ser verificada para os Critérios I e II.

Critério I

Dados de entrada:

- Teor de matéria orgânica no bioossólido ($MO_{\text{bioossólido}}$): 0,3 t·t⁻¹ (ou 30 dag·kg⁻¹)
- Teor de matéria orgânica no solo (MO): 0,5 dag·kg⁻¹
- Teor de matéria orgânica final ou desejada para o solo (MO_f): 3,0 dag·kg⁻¹
- Volume de solo em 1 hectare (V_s): 2.000 m³·ha⁻¹ (considerando profundidade de incorporação de 0,2 m)
- Densidade do solo (d_s): 1,2 g·cm⁻³

Solução:

a) Determinação da quantidade de matéria orgânica a ser incorporada no solo (MO_{inc}):

$$MO_{\text{inc}} = (MO_f - MO_i) \times V_s \times d_s = (3,0 \text{ dag} \cdot \text{kg}^{-1} - 0,5 \text{ dag} \cdot \text{kg}^{-1}) \times 2.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \times 1,2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} = 60 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$$

b) Determinação da dose de aplicação:

$$\text{Dose de aplicação} = \frac{MO_{\text{inc}}}{MO_{\text{bioossólido}}} = \frac{60 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}}{0,3 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}} = 200 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ de ST}$$

Critério II**Dados de entrada:**

Para a verificação da dose de aplicação conforme este critério, deve-se, primeiramente, calcular a necessidade de correção de acidez do solo (NC), que neste exemplo foi obtida a partir do método de saturação de bases.

- Capacidade de troca catiônica do solo a pH 7 (CTC): $6,0 \text{ cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$
- Saturação por bases atual do solo (Va): 30%
- Saturação por bases esperada do solo para a cultura (Ve): 60%, considerando plantio da leucena
- Poder de neutralização do biossólido (PN): 45,6%

Solução:

a) Determinação da necessidade de correção de acidez do solo (NC), que neste exemplo foi obtida a partir do método de saturação de bases.

$$NC = CTC \times \frac{Ve - Va}{100} = 6,0 \text{ cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3} \times \frac{60\% - 30\%}{100} = 1,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$$

b) Determinação da dose de aplicação:

$$\text{Dose de aplicação} = \frac{NC \times 100}{PRNT \text{ ou } PN} = \frac{1,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \times 100}{45,6\%} = 4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$$

Observações Finais:

- As doses de biossólido calculada pelos Critérios I e II são demasiadamente divergentes. Isso se deve ao fato de o biossólido obtido via estabilização alcalina possuir elevado pH, sendo a dose limitada pelo potencial de correção da acidez do solo.
- Caso se aplique a dose calculada pelo teor de matéria orgânica, haverá uma elevação do pH para além da faixa ótima (5,5 a 7,0), o que reduz a disponibilidade de nutrientes e prejudica o desenvolvimento das plantas. Sendo assim, verifica-se que o uso de biossólido obtido a partir da estabilização alcalina pode não ser o mais adequado para fins de recuperação de área degradada, quando se objetiva o aumento substancial de matéria orgânica no solo.

Exemplo 2: Considerando uma área degradada por atividades de mineração de ferro, avaliar a possibilidade de uso de biossólido Classe B2 como condicionador do solo dessa área. Nesse caso, a dose de aplicação deve ser verificada para os Critérios I e III.

Critério I

Assumindo as características do Exemplo 1, a dose de aplicação será de $200 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de ST.

Critério III

Neste exemplo hipotético, a caracterização quanto a substâncias químicas presentes no biossólido está representada na **Tabela 1**. Observa-se que a substância que confere o enquadramento na Classe 2 é o zinco, o que não exige, entretanto, a verificação das cargas máximas para as demais substâncias. Apesar do exemplo ter sido realizado com base no elemento zinco, na **Tabela 7** estão indicados os valores calculados para os demais elementos.

$$\text{Carga Zn (Critério I)} = \text{Dose de ST} \times \text{Conc. biossólido} = \frac{200 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \times 3.200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}}{1000} = 640 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$$

Tabela 7 – Verificação da carga aplicada de acordo com as substâncias químicas presentes no biossólido Classe 2.

Substância química	Concentração no biossólido ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Carga calculada Critério I ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$)	Carga máxima acumulada permitida ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$)
Arsênio	5	1	20
Bário	120	24	130
Cádmio	2	0,4	19
Cromo	50	10	1.500
Cobre	200	40	750
Chumbo	15	3	150
Mercúrio	0,03	0,006	9
Molibdênio	2	0,4	7
Níquel	15	3	210
Selênio	0,7	0,14	50
Zinco	3.200	640	1.400

Como pode-se observar, as cargas calculadas referente às substâncias químicas indicadas na Resolução CONAMA n° 498/2020 estão abaixo da carga máxima permitida, dispensando o cálculo da dose conforme Critério III. Logo, o fator limitante para a dose de aplicação é o conteúdo de matéria orgânica que se deseja alcançar no solo. Nesse exemplo, considerou-se que esta será a primeira aplicação de biossólido na área degradada, no entanto, no caso de aplicações posteriores, deve-se considerar a carga aplicada relativa proveniente das aplicações prévias.

Complementarmente aos estudos citados, nesta NT são apresentadas, em maior profundidade, duas experiências exitosas da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB) referentes à recuperação de áreas degradadas com biossólido. Cumpre destacar que as experiências aqui reportadas são em escala plena, executadas conforme projetos técnicos e de acordo com a Licença de Operação da CAESB.

4.1. Projeto de recuperação da Rede Ferroviária Federal (RFFSA)

O projeto de recuperação de área degradada da extinta Rede Ferroviária Federal (RFFSA) foi iniciado em meados de 2012 e objetivou a recuperação de uma área de cerca de 195 ha, localizada no Distrito Federal (DF). Historicamente, essa área foi explorada para extração de material necessário a obras de expansão do DF, o que provocou a perda da camada superficial do solo e impossibilitou sua recuperação natural. Esta área possuía superfícies degradadas, vulneráveis a processos erosivos.

A área que efetivamente recebeu biossólido compreende 116,7 ha, com declividade entre 0 e 5% e latossolo vermelho, a qual foi dividida em 20 talhões e subtalhões, de acordo com características locais. O plano de recuperação objetivou o acréscimo de matéria orgânica no solo para cerca de 2,5%, sendo que a divisão em talhões possibilitou a aplicação gradativa de biossólido, ao longo de aproximadamente três anos.

Para cada talhão, foi realizado, inicialmente, o preparo do terreno com medidas de conservação do solo, o qual pode envolver reconformação da superfície, descompactação, entre outros. Em seguida, houve o descarregamento do biossólido por meio de caminhões basculantes, com posterior distribuição e incorporação do material no solo, com o uso de tratores. Complementarmente, foi aplicado cal hidratada por meio de espalhadeira mecanizada, visando inibir a ocorrência de eventuais vetores e odores na área. Após cerca de 10 dias da incorporação do lodo, realizava-se um último gradeamento leve para uniformizar a aplicação do biossólido no solo e preparar a superfície para a etapa de revegetação. Esta etapa compreendeu,

primeiramente, a semeadura de espécies da família das leguminosas, cujo objetivo foi o desenvolvimento da vegetação de cobertura e adubação verde. A semeadura foi realizada no final do período chuvoso, sem complementação com adubos minerais. No início do período chuvoso subsequente, realizou-se o plantio de espécies arbustivas e arbóreas, mediante a adição de adubação complementar (NPK), conforme demanda nutricional das espécies selecionadas. As principais etapas de recuperação da área da RFFSA seguem ilustradas na **Figura 3**.

Ao final do processo de recuperação, em novembro de 2015, foram contabilizados cerca de 8.300 caminhões com biossólido (10 m^3 , em média cada). A taxa efetiva de aplicação de biossólido variou de 592 a $700 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ base úmida (equivalente a 77 a $91 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ST, respectivamente), proporcionando um acréscimo de 2,2% a 2,6% de matéria orgânica.

Um ano após a aplicação de biossólido nos primeiros subtalhões, foram realizadas análises de fertilidade do solo em áreas que não haviam recebido plantio de mudas ainda. Constatou-se que a matéria orgânica remanescente no solo estava na ordem de 1,5% e a maioria dos nutrientes apresentavam-se em níveis satisfatórios de fertilidade do solo, com exceção do potássio, tendo em vista os baixos teores deste elemento no biossólido. O acompanhamento do processo de recuperação da área ocorreu durante quatro anos após as intervenções iniciais. Na **Figura 4** é ilustrada a situação de uma parte da área antes e após a recuperação.

4.2. Projeto de recuperação da cascalheira Rajadinha

A área da cascalheira Rajadinha, também localizada no DF, foi explorada como jazida de cascalho, resultando na remoção da camada superficial de solo e consequente degradação. O projeto de recuperação foi similar ao do caso anterior, sendo iniciado com a divisão da área em seis talhões. Em seguida, realizou-se a reconformação da superfície do terreno e, posteriormente, a aplicação do biossólido, em setembro de 2015. A espécie selecionada para cobertura vegetal foi o milheto, atuando também como adubação verde.



Figura 3 – Área objeto de recuperação da RFFSA: (a) distribuição do biossólido, em 2012; (b) após incorporação do biossólido e espalhamento de cal hidratada; (c) após plantio de feijão guandu; (d) situação em 2016.

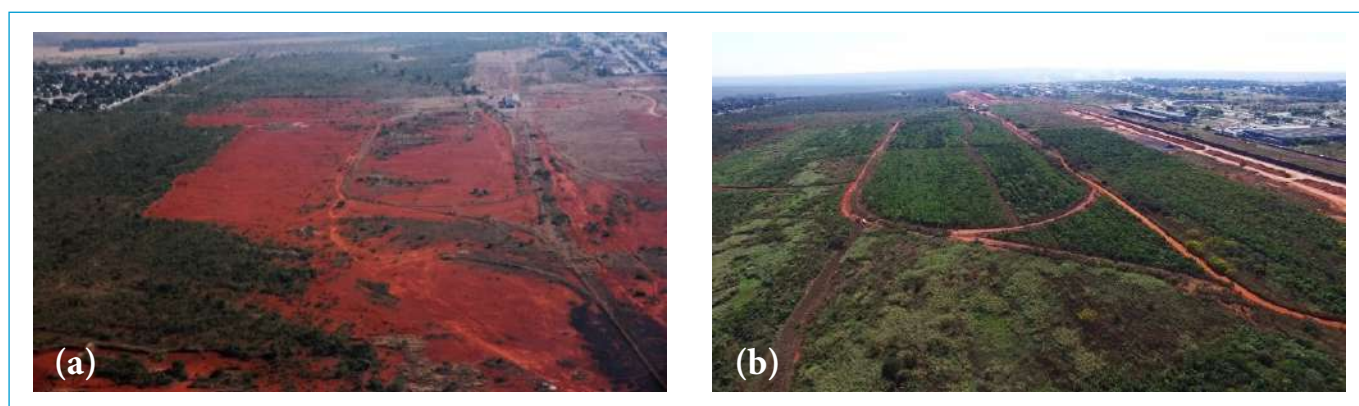


Figura 4 – Visão geral da área da RFFSA: (a) antes, em 2012; (b) após a recuperação, em 2016.

O plantio de mudas arbustivas e arbóreas foi realizado após um ano, ao final de 2016. As principais etapas de recuperação da cascalheira Rajadinha seguem ilustradas na **Figura 5**.

A área que efetivamente recebeu aplicação de biossólido foi de 10 ha, totalizando cerca de 550 caminhões ($10,5 \text{ m}^3$, em média). A taxa de aplicação foi de $584 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ base úmida ($98 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ST), equivalente ao acréscimo de 2,4% de matéria orgânica.



Figura 5 – Área objeto de recuperação da cascalheira Rajadinha: (a) situação inicial, em 2015; (b) após incorporação do biossólido e plantio do milho; (c) após plantio das mudas, no início de 2017; (d) situação em 2020.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aporte de matéria orgânica ao solo degradado é indispensável aos processos de recuperação de áreas degradadas. As experiências brasileiras, ainda que pontuais, indicam o potencial de uso do biossólido para esta finalidade, cujos principais atrativos estão associados aos elevados teores de matéria orgânica e nutrientes (especialmente nitrogênio).

A regulamentação do uso de biossólido para recuperação de áreas degradadas, por meio da Resolução CONAMA nº 498/2020, evidencia ainda mais esse potencial, principalmente ao possibilitar a aplicação tanto do biossólido Classe A ou B e Classe 1 ou 2 nestas áreas. Apesar das amplas possibilidades, a aplicação de biossólido não deve ocorrer de forma displicente, sob risco de agravar a qualidade ambiental de uma área já debilitada. Sendo assim, cumpre reforçar que o processo de recuperação deve ser realizado por profissional habilitado, em

conformidade com os critérios apresentados na referida Resolução, bem como em documentos que norteiam os projetos de recuperação de áreas degradadas. Por fim, tão importante quanto o planejamento inicial é o acompanhamento e monitoramento da área pós aplicação do biossólido.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis.

Este trabalho faz parte da série de publicações do INCT ETEs Sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ANDREOLI, C. V.; von SPERLING, M.; FERNANDES, F. *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 484 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuais, v. 6)
- BITTENCOURT, S.; MATOS, A. T.; SILVA, B. S.; MIKI, M. K.; BASTOS, R. K. X. Valoração e gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo no solo – Nota Técnica 2 - Aspectos legais. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 17-29, 2022.
- BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 4, p. 388-393, 2015.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biofóssido em solos, e dá outras providências. Brasília, DF, 2020.
- BUSATO, J. G.; CANELLAS, L. P.; DOBBSS, L. B.; BAUDOTTO, M. A.; AGUIAR, N. O.; ROSA, R. C. C.; SHIAVO, J. A.; MARCIANO, S. R.; OLIVARES, F. L. Guia para a Adubação Orgânica – Baseado na experiência com solos e resíduos do norte Fluminense. Manual técnico n. 14. Programa Rio Rural. Disponível em: <https://cdn.ciorganicos.com.br/wp-content/uploads/2013/09/Adubacao-organica-Pesagro-Manual14.pdf>. Acesso em: 27 de outubro de 2020.
- CAETANO, L. C. S.; CARVALHO, A. J. C. Efeito da adubação com boro e esterco bovino sobre a produtividade da figueira e as propriedades químicas do solo. *Ciência Rural*, v. 36, n. 4, p. 1150-1155, 2006.
- GUEDES, M. C.; ANDRADE, C. A.; POGGIANI, F.; MATTIAZZO, M. E. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, n. 2, p. 267-80, 2006.
- GRIM, R. E.; GÜVEN, N. Bentonites, Geology, mineralogy, properties and uses. In: Grim, R. E.; Güven, N. *Developments in Sedimentology*, 24. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1978. p. 256.
- IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Instrução Normativa nº 4, de 13 de abril de 2011. Procedimentos para elaboração de Projeto de Recuperação de Área Degradada - PRAD ou Área Alterada, para fins de cumprimento da legislação ambiental. Brasília, DF, 2011.
- KITAMURA, N. C.; LOURENZI, C. R.; BUENO, A. C.; PINTO, A. L.; SOARES, C. R. F. S.; GIACHINI, A. J. Biofóssido no estabelecimento de espécies herbáceas e nos atributos químicos e microbiológicos em solo impactado pela mineração de carvão. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, n. 4, p. 607-617, 2020.
- LEPSCH, I. *Formação e conservação dos solos*. 2ª ed. São Paulo, Brasil: Oficina de Textos, 2010, 216 p.
- MARTINS, S. *Recuperação de áreas degradadas: como recuperar áreas de preservação permanente, voçorocas, taludes rodoviários e áreas de mineração*. 3ª ed. Viçosa, Brasil: Aprenda Fácil, 2013. 264 p.
- MATOS, A. T. *Disposição de águas residuárias no solo*. Viçosa, Brasil: AEAGRI, 2006. 142 p.
- MATOS, A. T.; MATOS, M. P. *Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos*. Viçosa, Brasil: Editora UFV, 2017. 357 p.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. 2ª ed. Lavras, Brasil: Editora UFLA, 2006, 742 p.
- PRUSKI, F. *Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica*. 2ª ed. Viçosa, Brasil: Editora UFV, 2009. 279 p.
- SAMPAIO, T. F.; GUERRINI, I. A.; BACKES, C.; HELIODORO, J. C. A.; RONCHI, H. S.; TANGANELLI, K. M.; CARVALHO, N. C.; OLIVEIRA, F. C. Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características físicas do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 5, p. 1637-1647, 2012.
- SPITZCOVSKY, D. *Áreas degradadas no Brasil equivalem a duas Françás*. Exame, 2012. Disponível em: <https://exame.com/mundo/areas-degradadas-no-brasil-equivalem-a-duas-francas/>. Acesso em: 15 de agosto de 2020.
- SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: Novais, R. F.; Alvarez V. V. H.; Barros, N. F.; Fontes, R. L. F.; Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. (Eds.). *Fertilidade do solo*. Viçosa, Brasil: SBCS. 2007. p. 275-374.
- WOHLENBERG, E. V.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 5, p. 891-900, 2004.

