

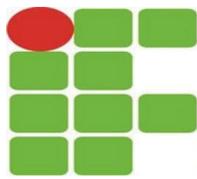
INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO  
Campus Rio Verde - GO

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
BACHARELADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC**

DIONATAN RUAN DA SILVA

**LODO DE ESGOTO COMO ALTERNATIVA  
SUSTENTÁVEL: TRAÇOS DA AGRICULTURA  
MODERNA**

Rio Verde  
2025



**INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO**  
Campus Rio Verde - GO

DIONATAN RUAN DA SILVA

# **LODO DE ESGOTO COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL: TRAÇOS DA AGRICULTURA MODERNA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Ambiental.

Orientador: Édio Damasio da Silva Junior

Rio Verde  
2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

D592r RUAN DA SILVA, DIONATAN  
LODO DE ESGOTO COMO ALTERNATIVA  
SUSTENTÁVEL: TRAÇOS DA AGRICULTURA MODERNA  
/ DIONATAN RUAN DA SILVA. RIO VERDE 2025.

62f. il.

Orientador: Prof. Dr. ÉDIO DAMASIO DA SILVA JUNIOR.  
Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220074 -  
Bacharelado em Engenharia Ambiental - Integral - Rio Verde  
(Campus Rio Verde).

1. LODO DE ESGOTO COMO ALTERNATIVA  
SUSTENTÁVEL: TRAÇOS DA AGRICULTURA MODERNA.  
I. Título.

# TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO

## PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS

### NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

#### IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- Tese (doutorado)  Artigo científico  
 Dissertação (mestrado)  Capítulo de livro  
 Monografia (especialização)  Livro  
 TCC (graduação)  Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Dionatan Ruan da Silva

Matrícula:

2019102200740441

Título do trabalho:

Lodo de esgoto como alternativa sustentável: Traços da agricultura moderna.

#### RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 05/09/2025

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

#### DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros; estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde

Local

01/09/2025

Data

DIONATAN RUAN DA  
SILVA:03893830154

Assinado de forma digital por DIONATAN RUAN  
DA SILVA:03893830154  
Dados: 2025.09.01 11:22:46 -03'00'

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

  
Assinatura do(a) orientador(a)

## Regulamento de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – IF Goiano - Campus Rio Verde

### ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos 22 dias do mês de agosto de dois mil e vinte e cinco às 14:00 horas, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: Prof. Édio Damásio da Silva Junior (orientador), Prof. Bruno de Oliveira Costa Couto (membro interno) e Prof. Andriane de Melo Rodrigues (membro interno), para examinar o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “**LODO DE ESGOTO COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL: TRAÇOS DA AGRICULTURA MODERNA**” de **DIONATAN RUAN DA SILVA**, estudante do curso de Engenharia Ambiental do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº **2019102200740441**. A palavra foi concedida ao estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **APROVAÇÃO** do estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Rio Verde, 29 de agosto de 2025.

*(Assinado eletronicamente)*

Edio Damasio da Silva Junior

Orientador

*(Assinado eletronicamente)*

Bruno de Oliveira Costa Couto

Membro da Banca Examinadora

*(Assinado eletronicamente)*

Andriane de Melo Rodrigues

Membro da Banca Examinadora

Documento assinado eletronicamente por:

- **Edio Damasio da Silva Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 29/08/2025 16:09:47.
- **Andriane de Melo Rodrigues**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 29/08/2025 16:56:42.
- **Bruno de Oliveira Costa Couto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 29/08/2025 19:13:28.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 29/08/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

**Código Verificador:** 738359

**Código de Autenticação:** 462ed05714





INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO  
Campus Rio Verde - GO

DIONATAN RUAN DA SILVA

# LODO DE ESGOTO COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL: TRAÇOS DA AGRICULTURA MODERNA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como  
requisito parcial para a obtenção do título de Bacharelado  
em Engenharia Ambiental.

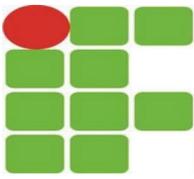
Orientador: Édio Damasio da Silva Junior

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

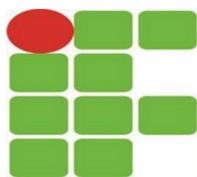
Édio Damasio da Silva Junior  
Departamento / instituição  
Membro

Segundo membro da Banca  
Departamento / instituição  
Membro

Terceiro membro da Banca  
Departamento / instituição  
Membro



**INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
**GOIANO**  
Campus Rio Verde - GO



INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO  
Campus Rio Verde - GO

DIONATAN RUAN DA SILVA

**Dedico este trabalho, com imensa gratidão e carinho,**

A minha família, por serem meu porto seguro e por me ensinarem o valor da educação e do esforço.

Aos meus amigos, por compartilharem comigo os momentos de desafio e de alegria. E, finalmente, aos meus orientadores e professores, por toda a sabedoria transmitida, que me guiou para o crescimento acadêmico e pessoal.

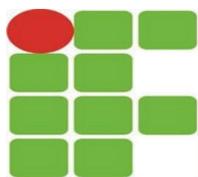
## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que em todo tempo foi a minha força e me ajudou a chegar até aqui;

Ao Prof. Édio Edio Damasio da Silva Junior, por sua paciência, dedicação e por acreditar no potencial deste trabalho.

Aos professores que ao longo desta caminhada acadêmica, foram fontes inestimáveis de conhecimento, inspiração e orientação. Suas palavras, conselhos e ensinamentos me guiaram durante os desafios e contribuíram diretamente para minha formação profissional e pessoal.

Estendo minha gratidão a todos os docentes que contribuíram para construção da base de conhecimentos que me trouxe até aqui. Cada aula, debate e desafio proposta foram essenciais para meu desenvolvimento acadêmico.



**INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
**GOIANO**  
Campus Rio Verde - GO

*“Educação não transforma o mundo.  
Educação muda as pessoas.  
Pessoas mudam o mundo”.*

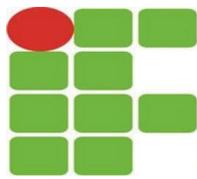
*(Paulo Freire)*

**RUAN, Dionatan. Lodo de esgoto como alternativa sustentável: Traços da agricultura moderna.** 2025. 55 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Ambiental – Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, 2025.

### **Resumo:**

O uso de lodo proveniente das estações de tratamento de esgoto (ETE) como insumo agrícola tem se mostrado uma alternativa viável para a reciclagem de nutrientes, promovendo a sustentabilidade e a redução da aplicação de fertilizantes químicos. Este estudo tem como objetivo revisar a literatura sobre a caracterização e os métodos de tratamento do lodo, bem como identificar e discutir as normas técnicas brasileiras que regulamentam seu uso como fertilizantes na agricultura, considerando sua composição química e microbiológica, os impactos ambientais e os benefícios agrônômicos para diferentes culturas. A aplicação desse resíduo no solo pode melhorar a estrutura e fertilidade do terreno, desde que sejam seguidos rigorosos critérios de controle para evitar contaminação por metais pesados e patógenos. O objetivo principal deste trabalho é demonstrar os benefícios e desafios do uso do lodo de esgoto em sistemas agrícolas, além de sugerir métodos de tratamento adequados para garantir a segurança ambiental e a eficiência do processo. Além dos benefícios agrônômicos, como o aumento da matéria orgânica e da capacidade de retenção de água no solo, o lodo tratado pode elevar significativamente a produtividade agrícola, graças à liberação gradual de nutrientes durante o ciclo das culturas. Métodos como a compostagem termofílica têm se mostrado eficazes na eliminação de patógenos, tornando o lodo seguro para uso agrícola. No entanto, a variabilidade na composição do lodo entre diferentes ETES requer padronização dos processos de tratamento, monitoramento constante e adequação às normas ambientais vigentes. O trabalho também destaca o potencial do lodo na mitigação das mudanças climáticas, por meio do sequestro de carbono no solo, além de enfatizar a importância de políticas públicas, incentivos econômicos e ações de conscientização para ampliar sua aceitação social. Conclui-se que, quando corretamente tratado e monitorado, o uso agrícola do lodo de esgoto representa uma estratégia eficaz para promover a sustentabilidade ambiental, a segurança alimentar e a gestão integrada de resíduos urbanos.

**Palavras-chave:** Lodo de esgoto, Estação de tratamento de esgoto, Agricultura sustentável, Fertilizante orgânico, Reciclagem de nutrientes.

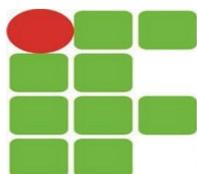


INSTITUTO FEDERAL DE  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO  
Campus Rio Verde - GO

**Abstract:**

The use of sludge from wastewater treatment plants (WWTP) as agricultural input has proven to be a viable alternative for nutrient recycling, promoting sustainability and reducing the need for chemical fertilizers. This study aims to analyze the feasibility of sewage sludge as a fertilizer, considering its chemical and microbiological composition, environmental impacts, and agronomic benefits for various crops. The application of this waste in soil can improve its structure and fertility, provided that strict control criteria are followed to avoid contamination by heavy metals and pathogens. The main goal of this paper is to demonstrate the benefits and challenges of using sewage sludge in agricultural systems, as well as to suggest appropriate treatment methods to ensure environmental safety and process efficiency.

**Keywords:** Sewage sludge, Wastewater treatment plant, Sustainable agriculture, Organic fertilizer, Nutrient recycling.



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
2	OBJETIVO .....	15
	2.1 Objetivo Geral .....	15
	2.2 Objetivo Específico .....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
	3.1 Conceito .....	16
	3.2 Definição .....	17
	3.3 Composição do Lodo .....	18
	3.3.1 Nutrientes .....	20
	3.3.2 Poluentes .....	22
	3.3.3 Micro-organismos Patógenos .....	24
	3.4 Tratamento .....	28
	3.4.1 Digestão Aeróbica .....	32
	3.4.2 Digestão Anaeróbica .....	34
	3.5 Destinação do Lodo .....	37
	3.5.1 Aterro Sanitário .....	38
	3.5.2 Incineração .....	39
	3.5.3 Compostagem .....	40
	3.5.4 Uso Agrícola .....	42
	3.6 Legislação .....	45
	3.6.1 Aplicação Sustentável .....	50
	3.6.2 Melhoramento no Solo e Produção .....	52
4	ACEITAÇÃO PÚBLICA .....	53
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	56
5	REFERÊNCIAS .....	58

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Santos (2015) o crescimento populacional e a expansão das áreas urbanas têm gerado um aumento considerável na quantidade de resíduos produzidos, incluindo o lodo proveniente das estações de tratamento de esgoto (ETE). Esse resíduo, antes considerado de difícil destinação final, tem sido alvo de estudos que buscam alternativas sustentáveis para seu uso. Dentre essas, destaca-se a aplicação do lodo como insumo na agricultura, com o objetivo de reciclar nutrientes e melhorar a fertilidade do solo.

O lodo de esgoto é formado durante o processo de tratamento de águas residuais e é composto por matéria orgânica, nutrientes essenciais (como nitrogênio e fósforo), além de uma série de elementos químicos que podem ser benéficos ou prejudiciais ao solo, dependendo da concentração e da forma como é tratado. Sua utilização na agricultura é baseada no potencial de substituição de fertilizantes químicos, fornecendo nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas (Carvalho, 2015).

Ainda que o lodo de esgoto possua potencial para uso agrícola, sua aplicação direta traz riscos importantes e inerentes, pois pode conter micro-organismos patogênicos, compostos orgânicos e metais pesados que, quando presentes em excesso, representam ameaça ao meio ambiente e à saúde humana. Por isso, é indispensável que passe por processos de tratamento capazes de minimizar esses perigos, garantindo que seu aproveitamento no campo seja seguro e sustentável.

A legislação brasileira tem se atualizado para regulamentar o uso do lodo de esgoto na agricultura, definindo parâmetros de qualidade e métodos de tratamento para minimizar os impactos negativos. Normas como a Resolução CONAMA n.º 498, de 19 de agosto de 2020 estabelece os requisitos para a utilização desse material em solos agrícolas, garantindo que o processo seja realizado de maneira segura e sustentável.

O sucesso dessa prática depende do monitoramento contínuo da qualidade do lodo e do solo, além da adoção de boas práticas agrícolas. Métodos como a compostagem e a digestão anaeróbia são frequentemente utilizados para tratar o lodo, reduzindo a presença de patógenos e metais pesados, ao mesmo tempo em que mantêm os nutrientes disponíveis para as plantas (CONAMA, 2020).

A percepção pública e a aceitação do uso do lodo de esgoto na agricultura também são fatores importantes para o sucesso dessa prática. Muitos produtores rurais ainda têm receio quanto à utilização desse material, devido à falta de informações claras sobre os benefícios e riscos. Campanhas de conscientização e a divulgação de estudos científicos que comprovam a segurança do processo são essenciais para aumentar a confiança dos agricultores (Embrapa, 2007).

Este estudo propõe analisar os métodos de tratamento do lodo de esgoto voltados à sua aplicação na agricultura, apoiando-se em informações e resultados previamente publicados na literatura científica. A abordagem contemplará tanto aspectos positivos, como a reposição de nutrientes e a melhoria da qualidade do solo, quanto os riscos ambientais e sanitários, incluindo a presença de microrganismos patogênicos.

### 1.1 Escolha do tema

A decisão de trabalhar com o tema **Lodo de esgoto como alternativa sustentável: Traços da agricultura moderna** surgiu do interesse em evidenciar alternativas sustentáveis para a produção agrícola, aliadas à gestão adequada de resíduos urbanos. Ao longo dos estudos realizados, tornou-se evidente que o lodo possui elevado potencial como insumo agrícola, fornecendo nutrientes essenciais ao solo e contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis. No entanto, observou-se que ainda existem lacunas no conhecimento sobre os métodos de tratamento, as aplicações adequadas e os impactos ambientais associados.

Para abordar essas lacunas, este trabalho adotou uma metodologia de revisão de literatura, permitindo a análise e síntese de informações já publicadas sobre o tema. Foram utilizados termos de busca como "lodo de esgoto", "biossólidos na agricultura", "tratamento de lodo" e "impactos ambientais do lodo". A pesquisa foi realizada em plataformas acadêmicas e científicas reconhecidas, incluindo o Google Acadêmico, o Portal de Periódicos da CAPES, além de bases de dados específicas de periódicos internacionais e nacionais.

Dessa forma, este estudo busca analisar de forma sistemática essas questões, oferecendo subsídios para a adoção segura e eficiente do lodo na agricultura e contribuindo para o avanço das práticas sustentáveis na área.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral:**

1. Analisar, por meio de revisão da literatura, os métodos de tratamento do lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto para sua aplicação como insumo agrícola, destacando benefícios, desafios, impactos ambientais e apresentando as normas regulamentadoras vigentes.

### **2.2 Objetivos Específicos:**

1. Investigar os principais métodos de tratamento do lodo de esgoto, avaliando sua eficiência na redução de patógenos para garantir a segurança ambiental.

2. Identificar as normas regulamentadoras que orientam o uso do lodo de esgoto na agricultura no Brasil, destacando os parâmetros de controle e qualidade exigidos.

3. Identificar os efeitos da aplicação do lodo de esgoto sobre a biodiversidade do solo, em micro-organismos benéficos e possíveis desequilíbrios ecológicos.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Conceito**

O lodo de esgoto consiste em um resíduo sólido ou semi-sólido gerado durante o tratamento de águas residuais em estações de tratamento de esgoto (ETE), composto predominantemente por matéria orgânica, nutrientes essenciais, como nitrogênio e fósforo, e outros elementos químicos que podem exercer efeitos benéficos ou prejudiciais ao solo, dependendo do manejo e do tipo de tratamento aplicado (SANTOS, 2015). Tradicionalmente, esse material era considerado de difícil destinação e, em grande parte, era encaminhado a aterros sanitários ou descartado inadequadamente, gerando impactos ambientais e riscos à saúde pública.

Com o avanço das pesquisas e o fortalecimento de práticas sustentáveis, o lodo de esgoto passou a ser valorizado como recurso agrícola, com potencial para substituir total ou parcialmente fertilizantes químicos, melhorar a fertilidade do solo e contribuir para a manutenção da matéria orgânica (CARVALHO, 2015). Entretanto, sua aplicação direta sem tratamento adequado apresenta riscos relevantes, incluindo a presença de microrganismos patogênicos e compostos orgânicos potencialmente tóxicos, o que torna imprescindível o emprego de métodos de tratamento capazes de assegurar a segurança ambiental e sanitária.

O lodo de esgoto pode ser classificado segundo sua origem e processo de tratamento, sendo comumente categorizado em primário, secundário ou terciário, cada categoria apresentando características físico-químicas e biológicas distintas, o que influencia diretamente na escolha da técnica de manejo e na forma de aplicação agrícola (EMBRAPA, 2007).

No contexto regulatório brasileiro, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece diretrizes específicas para o uso agrícola do lodo. A Resolução CONAMA nº 498/2020 define parâmetros de qualidade, limites de metais pesados, microrganismos e outros contaminantes, além de normas para tratamento, monitoramento e aplicação, garantindo a segurança do processo (CONAMA, 2020).

Dessa maneira, o lodo de esgoto deixa de ser compreendido apenas como um resíduo, passando a ser um recurso com potencial significativo, desde que manejado de acordo com critérios técnicos e regulatórios. O presente trabalho propõe-se a analisar criticamente os métodos de tratamento existentes, com base nos dados

e evidências disponíveis na literatura científica, buscando compreender os benefícios, limitações e impactos ambientais relacionados ao uso do lodo na agricultura, dentro de uma perspectiva de sustentabilidade e economia circular.

### 3.2 Definição

Segundo Sperling (2005), o lodo de esgoto é o principal subproduto do tratamento de esgotos, sendo gerado principalmente nos decantadores primários e secundários, bem como nas lagoas de estabilização.

De acordo com Metcalf-Eddy (1991), lodo é, sem dúvida, o que apresenta maior volume, e seu tratamento e disposição representam, possivelmente, o desafio mais complexo enfrentado por um engenheiro no campo do tratamento de águas residuais.

Conforme afirmam Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), o lodo gerado a partir do esgoto é caracterizado como "um resíduo semissólido resultante das várias fases do tratamento de esgoto sanitário, apresentando uma composição complexa que inclui matéria orgânica, microrganismos, nutrientes, metais e outros poluentes, sendo fundamental uma gestão apropriada para prevenir riscos à saúde da população e ao meio ambiente".

De acordo com Von Sperling (2005), o lodo gerado nas estações de tratamento de esgoto origina-se principalmente nas unidades de sedimentação primária e secundária. Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001) complementam que, além dessas etapas, há também a formação de lodo no fundo das lagoas de estabilização, exigindo remoção periódica. Bastos e Hernandez (2005) destacam que essa formação ocorre de forma mais intensa nas lagoas anaeróbias, onde a deposição de sólidos é contínua.

O tratamento de esgoto é uma das quatro áreas fundamentais que compõem o saneamento básico essencial. As demais incluem o tratamento de água potável, a gestão de resíduos sólidos e a drenagem de águas pluviais (Gobbi, 2003).

As estações de tratamento de esgoto desempenham um papel essencial para o meio ambiente e a saúde pública, processando diariamente milhões de litros de esgoto e reduzindo significativamente a carga orgânica lançada nos corpos hídricos. (Pereira Neto, 2007).

### 3.3 Composição do Lodo

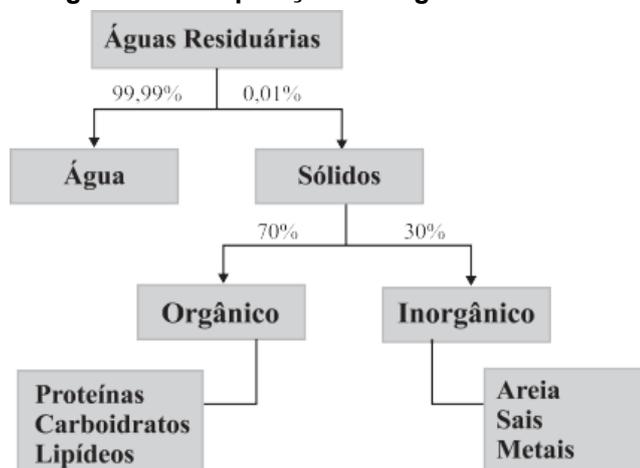
A geração do lodo de esgoto tem início no processo de coleta do esgoto sanitário, realizado por meio das redes de esgotamento implantadas nos centros urbanos. Essas redes são responsáveis por captar predominantemente o esgoto doméstico, composto por águas residuárias provenientes de banheiros, cozinhas, lavanderias e outras atividades residenciais. Esse sistema é fundamental para evitar o lançamento direto de efluentes nos corpos hídricos, minimizando riscos ambientais e sanitários (Souza; Von Sperling, 2013).

Além do esgoto doméstico, em algumas localidades, efluentes industriais previamente tratados também podem ser direcionados ao sistema público de coleta, desde que atendam aos padrões de lançamento definidos pelos órgãos ambientais competentes. Essa etapa de coleta é essencial, pois garante o encaminhamento adequado do esgoto para as Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), onde serão realizados os processos físicos, químicos e biológicos que resultam na formação do lodo passível de tratamento e reaproveitamento agrícola (Von Sperling, 2014).

Após a coleta, os efluentes são encaminhados para as Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), onde passam por diferentes processos até atingirem os padrões de qualidade exigidos para o lançamento em corpos hídricos. Segundo Jordão e Pessoa (2011), esses processos envolvem etapas preliminares, primárias, secundárias e, em algumas unidades, terciárias, que removem sólidos grosseiros, matéria orgânica e patógenos, garantindo um efluente tratado de forma ambientalmente segura. Durante essas etapas, ocorre também a formação do lodo de esgoto, subproduto que, após tratamento e estabilização adequados, pode ser destinado ao uso agrícola, conforme regulamenta a Resolução CONAMA nº 498/2020 (BRASIL, 2020).

A composição do esgoto varia conforme o local de origem – seja de uma área predominantemente residencial ou industrial – além de fatores sazonais, entre outros. A Figura 1 apresenta a composição básica do esgoto doméstico observada nas estações de tratamento.

**Figura 1 – Composição do esgoto Doméstico**



Fonte: Melo & Marques, 2000

Um lodo de esgoto típico apresenta em torno de 40% de matéria orgânica, 4% de nitrogênio, 2% de fósforo, os demais macros e micronutrientes, além de elementos potencialmente tóxicos.

Imhoff (1986) Os teores de sólidos e de água estão diretamente ligados à quantidade de lodo gerado em diferentes tipos de tratamento. Cada método aplicado ao tratamento de esgotos domésticos possui características específicas. A produção de lodo é variável segundo o tipo de tratamento, conforme apresentado na tabela 1.

**Tabela 1 – Produção de lodo de esgoto em sistemas aeróbios e anaeróbios.**

TIPO DE TRATAMENTO	QUANTIDADE DE LODO PRODUZIDA (M3 /HAB./ANO)
Lagoa facultativa primária	0,037
Lagoa facultativa	0,03 - 0,08
Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa	0,01 - 0,04
Lagoa aerada facultativa	0,03 - 0,08
Lodos ativados convencionais	1,1 - 1,5
Lodos ativados (aeração prolongada)	0,7 - 1,2
Lodos ativados (fluxo intermitente)	0,7 - 1,5
Filtro biológico (baixa carga)	0,4 - 0,6
Filtro biológico (alta carga)	1,1 - 1,5
Biodiscos	0,7 - 0,1
Reator anaeróbio de manta de lodo	0,07 - 0,1
Fossa séptica - filtro anaeróbio	0,07 - 0,1

Fonte: Arceivala (1981), EPA (1979, 1981, 1992), Metcalf & Eddy (1991), Vieira (1993), Sperling (1995) e Nascimento (1997).

São provenientes da água bruta e estão presentes no lodo: algas, bactérias, vírus, partículas orgânicas em suspensão, colóides, partículas minerais do tamanho areia, silte, argila e elementos químicos dissolvidos (como por exemplo, cálcio, magnésio, ferro e manganês) (Grandin et al., 1993).

### 3.3.1 Nutrientes

O fertilizante orgânico é um produto obtido por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matérias-primas de origem industrial, urbana ou rural, animal ou vegetal, isoladas ou misturadas, podendo ser enriquecido de nutrientes minerais, princípio ativo ou agente capaz de melhorar suas características físicas, químicas ou biológicas (Mapa, 2009).

Os elementos Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) são macronutrientes primários enquanto os elementos Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S), secundários (Mapa, 2009).

**Tabela 2. Teores totais de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) presentes nos compostos orgânicos provenientes da compostagem de resíduos orgânicos.**

Macronutrientes	(g kg <sup>-1</sup> )	VR <sup>(1)</sup>
N	23,0	5,0
P	4,0	nd
K	8,0	nd
Ca	6,7	10
Mg	2,4	10
S	3,4	10

Valores de Referência (g kg<sup>-1</sup>) para fertilizantes orgânicos conforme o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Fonte: MAPA, 2009

O Nitrogênio (N), o Fósforo (P) e o Potássio (K), são os elementos essenciais às plantas sendo requisitados em quantidades elevadas em relação aos demais macronutrientes (Embrapa, 2013).

Como a concentração de alguns nutrientes no biossólido é baixa, há necessidade de complementação com outras fontes de fertilizantes, principalmente

para o caso do fósforo (grande exigência pelas plantas e baixa concentração na maioria dos solos brasileiros), e do potássio (baixa concentração no biossólido). A dosagem a ser utilizada será em função do resultado da análise do solo e das exigências nutricionais da cultura a ser implantada (Bunting et al., 1992).

Com a decomposição do lodo no solo, o nitrogênio orgânico é transformado em amônio ou nitrato. Enquanto os colóides do solo podem reter o amônio, o nitrato, se não absorvido pelas plantas e em condições de alta umidade, pode ser lixiviado para fora da zona radicular devido à baixa capacidade do solo de retê-lo. Em condições redutoras, ocorre a desnitrificação, processo que converte o nitrato em nitrogênio gasoso. Outro ponto fundamental é o balanço do nitrogênio (Brandão, et al 2015).

A matéria orgânica do lodo aplicado ao solo se mineraliza, liberando nitrogênio nas formas amoniacal e nítrica, que se somam ao nitrogênio presente antes da aplicação. Assim, a quantidade de lodo aplicada deve ser adequada para que o teor de nitrato ou amônio não ultrapasse o que a planta pode absorver, evitando o excesso lixiviável que pode contaminar lençóis freáticos. Esse elemento é, possivelmente, um dos mais importantes a serem monitorados nas áreas de aplicação de lodo, dado o risco de contaminação das águas subterrâneas. Socol & Paulino (2000) discutem amplamente os riscos de contaminação do agroecossistema com parasitos em função do uso agrícola do lodo de esgoto.

**Tabela 3. Teores totais de boro(B), cobre (Cu), zinco (Zn), ferro (Fe), manganês (Mn) e sódio (Na) presentes nos compostos orgânicos provenientes da compostagem de resíduos orgânicos.**

Micronutrientes	(g kg <sup>-1</sup> )	VR <sup>(1)</sup>
B	15,1	300
Cu	44,6	500
Zn	104,7	1000
Fe	2372,0	2000
Mn	551,9	500
Na	180,0	nd

(1) Valores de Referência (g kg<sup>-1</sup>) para fertilizantes orgânicos conforme o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Os metais presentes no solo ocorrem de forma natural, entretanto suas concentrações são baixas, em partes por milhão, assim também se dá a sua solubilidade. Cabe lembrar que os micronutrientes boro (B), cobre (Cu), zinco (Zn), ferro (Fe), manganês (Mn) e sódio (Na) são metais e que o limite entre a essencialidade e a toxicidade é dada pela dose de aplicação do lodo de esgoto ou concentração disponível no solo às plantas (Bettioli, W.; Camargo, 2006).

Apesar de não possuir valor mínimo de referência para fertilizante orgânico, segundo o Mapa (2009), o valor de sódio (Na) não é considerado elevado, o qual pode ter sido perdido pela sistemática de umedecimento das leiras, onde os hidrogênios presentes na água são adsorvidos pelas micelas coloidais húmicas, que liberam outros cátions, o que explicaria a redução da disponibilidade deste componente nos resultados finais (Reis, 2005).

Berton (2000), discute com detalhes os riscos de contaminação do agroecossistema com metais pesados. O nitrogênio é essencial para o crescimento das plantas e para os organismos do solo. A aplicação adequada do lodo deve buscar uma utilização eficiente do nitrogênio, minimizando perdas por percolação, volatilização, desnitrificação e escoamento superficial.

Outro grupo de contaminantes que merece atenção é o dos compostos orgânicos persistentes. Até o momento no Brasil, nenhuma norma estabelece limites para esses compostos. Além disso, são extremamente escassos os trabalhos com esses contaminantes no Brasil, existindo praticamente apenas uma análise apresentada por Tsutiya (2001).

### **3.3.2 Poluentes**

Diante de todas as vantagens existentes com o uso do LODO, é possível notar em sua composição elementos tóxicos, contando com a presença de metais pesados, como cádmio, chumbo e mercúrio, que podem ser tóxicos para as plantas, animais e humanos.

Estudos realizados por Amorim et al. (2021) mostraram que, dependendo da origem do esgoto e do processo de tratamento a que é submetido, o lodo pode conter níveis elevados desses contaminantes. Assim, em todos os países onde o lodo de esgoto é utilizado na agricultura, existem regulamentações que estabelecem, entre

outros critérios, as concentrações máximas permitidas de metais pesados no lodo e o limite máximo acumulado no solo.

A Resolução CONAMA n.º 498/2020 estabelece esses limites, sendo apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4. Valores máximos permitidos de substâncias químicas no bioossólido a ser destinado para solos.**

Substâncias Químicas	Valor Máximo permitido no bioossólido (mg/kg <sup>-1</sup> ST)	
	CLASSE 1	CLASSE 2
Arsênio	41	75
Bário	1300	1300
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

Fonte: Resolução CONAMA nº 498/2020

Essa abordagem é adotada globalmente: a Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda o emprego do conceito de múltiplas barreiras, que envolve etapas de tratamento, monitoramento e medidas preventivas para reduzir a exposição a esses poluentes, assegurando que o material aplicado no solo seja seguro para a saúde humana e ambiental. De acordo com a OMS (2006), os principais grupos de poluentes presentes no lodo de esgoto incluem: patógenos (bactérias, vírus, protozoários e helmintos), metais pesados (cádmio, chumbo, mercúrio, níquel) e compostos orgânicos, como pesticidas residuais e fármacos, que podem persistir no solo e afetar a qualidade das culturas agrícolas.

Complementando essas diretrizes, a União Europeia regulamenta a aplicação de lodo de esgoto por meio da Diretiva 86/278/CEE (Sewage Sludge Directive), que estabelece limites específicos para metais pesados, incluindo cádmio, cobre, mercúrio, níquel, zinco, chumbo e cromo, além de determinar critérios para

monitoramento do solo e do lodo, com o objetivo de proteger tanto a saúde humana quanto o meio ambiente (EU, 1986).

Dessa forma, tanto a OMS quanto a União Europeia enfatizam que a redução, controle e monitoramento de poluentes são essenciais para o uso seguro do lodo de esgoto na agricultura. Tais orientações reforçam a importância de métodos de tratamento adequados e de práticas regulatórias que assegurem a reutilização sustentável desse resíduo, alinhando-se aos princípios da economia circular e da sustentabilidade ambiental.

Para minimizar esses riscos, são necessários tratamentos adicionais que envolvem a remoção ou redução dos níveis de metais pesados, além da realização de análises periódicas para garantir que as concentrações desses elementos estejam dentro dos limites estabelecidos pela legislação. Neste caso, deve-se controlar e monitorar a aplicação, em especial do zinco, cobre e níquel, se presentes em teores elevados poder ser fitotóxicos.

A aplicação de lodo de esgoto pode estimular e causar alterações nas propriedades químicas do solo, devido ao aumento de carbono e nutrientes disponíveis, ou inibir, devido à presença de metais pesados e outros poluentes, a atividade microbiana do solo (Baath, 1989; Pontes, 2002). Portanto, o comportamento da população microbiana depende diretamente da qualidade e da quantidade do lodo aplicado, reforçando a necessidade de manejo adequado e monitoramento contínuo, em conformidade com padrões nacionais e internacionais de segurança ambiental.

### **3.3.3 Micro-organismos Patógenos**

Silva, et al (2018) estabelece que entre os fatores biológicos limitantes ao uso do lodo na agricultura destacam-se os patógenos, presentes no esgoto doméstico e, conseqüentemente, concentrado nos lodos provenientes dos sistemas de tratamento. A presença destes agentes patogênicos, ainda que substancialmente reduzida, podem causar problemas devido a sua possibilidade de disseminação pelo meio ambiente.

A composição dos micro-organismos presentes no lodo de esgoto varia conforme diversos fatores, tais como as condições socioeconômicas e sanitárias da população, a região geográfica, a presença de indústrias agroalimentares e o tipo de

tratamento aplicado ao lodo (Silva, et al 2001).

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente, a concentração desses micro-organismos no esgoto é reflexo direto do perfil de saúde da população que o originou. Mesmo países desenvolvidos produzem lodo contendo organismos patogênicos, o que não impede a utilização do lodo na agricultura de forma segura. O risco de contaminação é facilmente eliminado com a adoção de tecnologias que levam a redução destes organismos a níveis compatíveis com a reciclagem agrícola, como a compostagem (MMA, 2006).

A tabela 5 apresenta o tempo de sobrevivência dos diferentes tipos de agentes patogênicos presente no lodo.

**Tabela 5. Tempo máximo de sobrevivência de agentes patogênicos do lodo no solo.**

Patógenos	Solo		Plantas	
	Máximo absoluto	Máximo Comum	Máximo Absoluto	Máximo Comum
Bactéria	1 ano	2 meses	6 meses	1 mês
Vírus	6 meses	3 meses	2 meses	1 mês
Protozoários	10 dias	2 dias	5 dias	2 dias
Helmintos	7 anos	2 anos	5 meses	1 mês

Fonte: Adaptado de Kowal, 1985.

Em relação aos patógenos no lodo, Andreoli et al. (2014) discutem que a quantidade presente depende das condições socioeconômicas de cada país e região, das condições sanitárias nas quais foi gerado e dos métodos de tratamento aplicados.

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento os lodos de esgoto contêm patógenos humanos como coliformes fecais, salmonela, vírus, bactérias, cistos de protozoários e ovos de helmintos, que são passíveis de serem reduzidos com tratamento adequado. Entretanto, é muito importante o monitoramento da população desses organismos, tanto no lodo a ser utilizado na agricultura, como no solo onde ele foi aplicado (Mapa, 2020).

Segundo Silva, et al (2001) as bactérias encontradas no lodo de esgoto têm origem na flora intestinal humana e animal, no solo, no ar e na água, estando presentes nos sistemas de tratamento de esgoto das cidades brasileiras. Esses

organismos típicos apresentam maior sensibilidade aos processos de tratamento do lodo, sendo sua presença significativamente reduzida pela ação da radiação solar e pela desidratação do material (Bonnet, 2000).

A maior parte das bactérias patogênicas é transmitida ao ser humano principalmente pela via fecal-oral, por meio do consumo de alimentos ou água contaminados. Além disso, a inalação de partículas que carregam esses micro-organismos também pode causar infecções (Soccol et al, 2000).

A quantidade de micro-organismos presentes no esgoto sanitário pode variar bastante, porém, os sistemas de tratamento atuais não conseguem eliminar todos os agentes patogênicos a níveis que atendam plenamente às normas ambientais para uso agrícola, conforme apresentado na tabela 6.

**Tabela 6. Redução de micro-organismos durante digestão anaeróbica de esgoto sanitário**

Micro-organismo	Etapas do processo	Média geométrica em NMP
Coliforme total	Lodo misturado <sup>1</sup>	$1,31 \times 10^{10}$
	Líquido decantado <sup>2</sup>	$6,89 \times 10^5$
Coliforme Fecal	Lodo misturado	$1,59 \times 10^9$
	Líquido decantado	$4,44 \times 10^5$

<sup>1</sup> Organismos.  $100 \text{ g}^{-1}$  de lodo úmido, <sup>2</sup> Organismo.  $100 \text{ mL}^{-1}$  NMP= Número Mais Provável

Fonte: Adaptado de Claret et al, 1999.

Os coliformes termotolerantes são um subconjunto do grupo de coliformes totais que podem fermentar a lactose à temperatura de 44,5. Entre os diversos fatores capazes de realizar a desinfecção do lodo, destacam-se a temperatura, o pH e a radiação solar, considerados os mais eficazes nesse processo. Esses agentes possuem faixas de atuação específicas e, quando ultrapassadas, promovem a eliminação dos micro-organismos presentes (Andreoli et al, 2001).

De acordo com Silva, et al (2001), A contaminação viral geralmente se dá por vias diretas, tais como a via oral, aspiração ou ingestão de lodo. Ademais, a exposição também pode ocorrer através do consumo de água ou alimentos contaminados, os quais podem conter lodo e os agentes patogênicos correspondentes.

Para que haja reprodução do vírus, há a necessidade de um hospedeiro

Bonnet, et al (2000). Contudo, esses organismos podem estar presentes no lodo de esgoto provenientes de diferentes tipos de tratamentos existentes. Silva, et al (2001) destaca que a concentração viral pode variar significativamente, influenciada por fatores como a condição de saúde da população atendida pelo sistema de saneamento básico, o tipo de tratamento aplicado ao esgoto nas estações de tratamento e o método de estabilização utilizado no solo.

A fezes humanas podem conter uma grande diversidade de agentes patogênicos, conforme tabela 7 apresentada.

**Tabela 7: Principais protozoários, helmintos encontrados no lodo de esgoto**

<b>Organismos</b>	<b>Patologias</b>
<b>Protozoários</b>	
<i>Cryptosporidium sp</i>	Gastroenterite
<i>Giardia intestinalis</i>	Diarreia
<i>Entamoeba Histolytica</i>	Disenteria
<i>Balantidium coli</i>	Diarreia e Disenteria
<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmose
<b>Helmintos</b>	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Distúrbios gastrointestinais
<i>Trichuris trichiura</i>	Diarreia e dores abdominais
<i>Toxocora sp</i>	Diarreia e dores abdominais

Fonte: Ademe, (1988); Soccol, et al, (2000).

Na etapa de separação do tratamento de efluentes, os micro-organismos se fixam às partículas sedimentares, o que resulta no aumento da sua concentração. No entanto, parte desses micro-organismos pode sofrer desnaturação, o que compromete sua funcionalidade. (Silva, et al, 2001).

A exposição direta à luz solar é uma das alternativas utilizadas para reduzir a presença de patógenos no lodo. Porém, sua eficiência varia de acordo com as condições ambientais de cada local. No Brasil, estudos vêm sendo conduzidos para avaliar o real potencial da radiação solar nesse processo de desinfecção. Além disso, existem outras formas de radiação, como as do tipo  $\beta$  e  $\gamma$  (oriundas de Co-60 ou Ce-139), que também podem ser aplicadas com o auxílio de equipamentos específicos desenvolvidos para essa finalidade (Tsutiya, 2001).

Com relação ao perfil sanitário do lodo, na Resolução CONAMA nº 498/2020 é limitada a presença de alguns patógenos indicadores da qualidade do biossólido. Estes indicadores são os coliformes fecais e os ovos de helmintos. Estando controlados estes organismos, os demais agentes patogênicos presentes no lodo também estarão em níveis compatíveis com o uso na agricultura.

Mesmo apresentando um perfil sanitário aprovado pela norma, o lodo não pode ser aplicado indiscriminadamente. Condições e restrições quanto às culturas em que o lodo pode ser aplicado, ao risco de transporte por percolação e erosão e à exposição de pessoas por contato direto ao lodo ou por águas contaminadas (Brasil, 2006).

A aplicação de lodo de esgoto no solo pode provocar mudanças nas suas propriedades químicas, físicas e biológicas, influenciando a estrutura e o funcionamento do agroecossistema. Entre os elementos mais sensíveis a essas alterações está a comunidade microbiana, que pode servir como um importante indicador da qualidade do solo (Dick, 1994; Giller et al., 1998).

Assim, os métodos de higienização precisam garantir a diminuição dos patógenos a níveis seguros, que não comprometam a saúde humana nem causem impactos ambientais, garantindo a segurança na utilização do produto para fins de reciclagem agrícola.

### **3.4 TRATAMENTO**

A caracterização microbiológica envolve a identificação de coliformes fecais, *Salmonella* spp., e ovos de helmintos, que são indicadores da presença de organismos patogênicos no lodo. A eliminação ou redução significativa desses organismos é essencial para garantir a segurança do lodo quando aplicado em solos destinados ao cultivo de alimentos. A metodologia utilizada seguiu as diretrizes da Resolução CONAMA n.º 498/2020, que define os parâmetros de aceitação para a presença desses organismos no lodo (Silva, 2021).

De acordo com Von Sperling (2005) na etapa preliminar quando o esgoto chega à Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), os sólidos maiores e mais consistentes são retidos no gradeamento, enquanto areia e resíduos menores são capturados no desarenador, esta etapa preliminar do esgoto é caracterizado pelo uso

de processos físicos, cujo objetivo é reter sólidos grosseiros e materiais pesados. Entretanto esta etapa não gera o típico lodo de esgoto sanitário, os resíduos sólidos removidos devem ser adequadamente coletados e destinados.

Em seguida, de acordo com Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), no tratamento primário ocorre a remoção dos sólidos sedimentáveis pela ação da gravidade e se forma o chamado lodo primário, composto por matéria orgânica e inorgânica sedimentada. Neste tratamento os processos físicos continuam predominando, especialmente por meio da sedimentação nos decantadores primários, onde ocorre a separação dos sólidos sedimentáveis presentes no esgoto bruto. Em algumas estações, essa etapa pode incluir processos químicos, como a adição de coagulantes para aumentar a eficiência da remoção de sólidos.

No tratamento secundário, a matéria orgânica é eliminada por meio da atividade biológica, composta por bactérias, fungos e protozoários que realizam a degradação de acordo com (Teixeira Pinto, 2001). Sistemas como lodos ativados, reatores anaeróbios e biodiscos são comumente utilizados nessa etapa. Após o tratamento biológico, o esgoto passa por um novo processo de decantação, originando o lodo secundário, formado principalmente por biomassa microbiana excedente. Conforme Von Sperling (2005), esse lodo possui alta umidade e necessita de tratamento específico para disposição final.

Por fim, no tratamento terciário, aplicam-se geralmente processos químicos e físicos adicionais, voltados exclusivamente para eliminação de nutrientes minerais como nitrogênio e fósforo, metais pesados e patógenos. Aqui são utilizados produtos químicos como sais de ferro ou alumínio para precipitação, além de etapas como filtração e desinfecção, caso as etapas anteriores não tenham alcançado a qualidade esperada. (Von Sperling, 2005), conforme a Figura 2.

De acordo com Souza et al. (2016) explicam que na fase de tratamento terciária pode ocorrer de gerar quantidades menores de lodo, porém com características mais específicas, exigindo controle rigoroso para descarte ou reuso.

Durante o tratamento de águas residuais, é gerado um lodo, caracterizado como um resíduo semissólido e pastoso. Esse material contém uma alta concentração de matéria orgânica, nutrientes minerais essenciais, além de diversas substâncias químicas, tanto de origem orgânica quanto inorgânica. Também pode conter metais

pesados, dependendo da origem da água tratada (Xu, 2014).

O lodo apresenta um odor característico, resultado da decomposição de matéria orgânica e de processos biológicos envolvidos no tratamento. Devido à sua composição rica em nutrientes e matéria orgânica, esse lodo pode atrair vetores, como insetos e roedores, representando um risco potencial à saúde pública (Xu, 2014).

**Figura 02: Etapas do funcionamento do tratamento convencional de esgoto**



Fonte: SAAE Itabira (s.d.).

Durante o tratamento de águas residuais, forma-se lodo, que é um resíduo semissólido e pastoso, contendo grande quantidade de matéria orgânica, nutrientes minerais, substâncias químicas tanto orgânicas quanto inorgânicas, metais, além de ter um odor distinto. Esse lodo pode atrair vetores e possui elevadas quantidades de micro-organismos patogênicos. (Xu, 2014).

Com base nos resultados das análises físico-químicas e microbiológicas, o lodo coletado é submetido a diferentes tratamentos, incluindo compostagem e digestão anaeróbica. A compostagem termofílica é selecionada como um dos métodos de tratamento, devido à sua eficácia na eliminação de patógenos e estabilização da matéria orgânica, conforme discutido por Santos (2022). O processo é realizado em unidades experimentais de compostagem, com o controle da temperatura, umidade e aeração durante um período de 60 dias. Amostras do lodo são coletadas periodicamente para avaliar a redução de patógenos e a estabilidade da matéria orgânica.

Paralelamente, outra fração das amostras de lodo é submetida à digestão

anaeróbica, um processo amplamente utilizado para o tratamento de lodo em estações de tratamento de esgoto. Esse método envolve a decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio, produzindo biogás como subproduto (Silva, 2021). A digestão anaeróbica é realizada em reatores laboratoriais, com o monitoramento contínuo da produção de biogás e da redução de sólidos voláteis. Após o tratamento, o lodo é avaliado quanto à sua adequação para uso agrícola.

As áreas experimentais são preparadas com a seleção de parcelas de solo com características físicas e químicas distintas, a fim de avaliar o impacto do lodo em diferentes condições edafoclimáticas. São selecionadas culturas de interesse agrícola, como milho, soja e trigo, que apresentam alta demanda por nutrientes (Campos et al., 2019). O lodo é aplicado em diferentes doses, seguindo as recomendações estabelecidas pela literatura e pelas normas regulamentadoras.

Após as etapas de tratamento e adensamento, o lodo de esgoto passa por processos de secagem, que têm como objetivo reduzir seu teor de umidade, facilitar o manuseio, diminuir custos de transporte e garantir maior segurança sanitária. Entre as principais técnicas utilizadas no Brasil, destacam-se a secagem solar e a secagem térmica (Von Sperling, 2013)

A secagem solar é o método mais amplamente adotado, especialmente em ETEs de pequeno e médio porte, devido ao seu baixo custo de implantação e operação. O lodo é disposto em leitos de secagem — estruturas abertas, geralmente construídas em alvenaria ou concreto, onde o material permanece exposto ao sol e ao vento até atingir um teor de umidade adequado. Esse processo, além de eficiente, utiliza recursos naturais e demanda baixa manutenção, porém pode ser mais lento em períodos chuvosos ou em regiões com baixa insolação (Souza; Von Sperling, 2013).

Já a secagem térmica é um processo mais sofisticado, empregado principalmente em ETEs de grande porte. Nesse método, o lodo é submetido a temperaturas elevadas (acima de 80°C) em equipamentos específicos, promovendo a rápida evaporação da água e garantindo uma higienização mais eficiente, com redução significativa da carga de patógenos e odores (Jordão; Pessôa, 2011). Apesar de apresentar maior custo energético e de operação, essa técnica gera um produto final com menor volume, maior teor de sólidos e melhor qualidade sanitária, o que facilita seu transporte e utilização agrícola.



Na etapa subsequente, a respiração endógena predomina. No início dessa fase, a população de microrganismos atinge seu pico, mas a disponibilidade de substrato é reduzida. Como resultado, os microrganismos mais frágeis não conseguem sobreviver e liberam polissacarídeos provenientes de suas membranas plasmáticas. Esses polissacarídeos servem como uma matriz, na qual os microrganismos se agrupam, formando flocos. Com a escassez crescente de substrato, o principal alimento disponível passa a ser o próprio protoplasma celular, resultando na oxidação do material microbiano. (Wef, 2007).

Além desses mecanismos, a digestão aeróbia é reconhecida como um processo simples e eficiente, especialmente em estações de pequeno e médio porte. Sua operação não demanda sistemas complexos, e a estabilização da matéria orgânica ocorre de forma relativamente rápida, o que favorece seu uso em municípios com menor disponibilidade de recursos ou em sistemas descentralizados de tratamento (Shao et al., 2013).

Do ponto de vista operacional, o processo é geralmente conduzido sob condições mesofílicas, com temperaturas entre 20 °C e 40 °C e tempo de retenção de sólidos variando de 10 a 15 dias, dependendo da carga orgânica inicial e do projeto da ETE. A aeração contínua não apenas garante a presença de oxigênio, mas também promove a mistura homogênea do lodo, favorecendo a degradação uniforme do material orgânico (Jordão; Pessôa, 2011; Shammas; Wang, 2007).

A estabilização biológica promovida por esse método também reduz significativamente odores e patógenos, tornando o lodo mais seguro para manuseio, transporte e até para uso agrícola, quando atende aos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 498/2020 (Brasil, 2020). Outro aspecto positivo é que o processo não gera metano (CH<sub>4</sub>), um dos principais gases de efeito estufa, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais e alinhando-se a práticas sustentáveis (Wef, 2007).

Por outro lado, a digestão aeróbia apresenta algumas limitações. O elevado consumo energético, devido à necessidade de aeração contínua, pode aumentar significativamente os custos operacionais, especialmente em ETEs de grande porte. Além disso, o processo não permite o aproveitamento energético, diferentemente da digestão anaeróbia, que possibilita a geração de biogás e, conseqüentemente, de

energia elétrica ou térmica (Jordão; Pessoa, 2011).

Quando conduzida dentro dos padrões técnicos e em conformidade com as regulamentações vigentes, a digestão aeróbia é considerada uma tecnologia segura e eficaz para estabilização do lodo, podendo ser destinada tanto à disposição final em aterros sanitários quanto a usos benéficos, como a aplicação agrícola. O cumprimento das exigências legais, especialmente as relacionadas ao controle de contaminantes e patógenos previstas na Resolução CONAMA nº 498/2020, garante que o processo seja ambientalmente seguro e tecnicamente adequado (Brasil, 2020).

### 3.4.2 Digestão Anaeróbica

A digestão anaeróbia é um processo microbiológico anaeróbio, na qual toda a matéria orgânica é degradada produzindo uma mistura de gases como o metano, o dióxido de carbono, hidrogênio, amônia e o ácido sulfídrico, entre outros produtos (Chernicharo, 1997).

Trata-se de um processo bioquímico complexo no qual diferentes grupos de organismos anaeróbicos e facultativos assimilam e degradam a matéria orgânica de forma simultânea. Geralmente, os sólidos em suspensão, tanto fixos quanto voláteis, são separados do efluente líquido que chega à estação de tratamento de esgoto (ETE) e direcionados para digestores, reatores biológicos ou biodigestores. Nesses sistemas, ocorre a decomposição anaeróbica, caracterizando o processo de digestão anaeróbia.

Esse processo é dividido em quatro fases microbiológicas principais, que ocorrem de forma integrada: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Chernicharo, 2007; Metcalf & Eddy, 2014).

Na hidrólise, compostos orgânicos complexos, como proteínas, carboidratos e lipídios, são quebrados em moléculas mais simples, como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, por meio da ação de enzimas extracelulares produzidas por bactérias hidrolíticas (Appels et al., 2008).

Na fase de acidogênese, essas moléculas mais simples são fermentadas por bactérias acidogênicas, gerando ácidos graxos voláteis (AGVs), hidrogênio e dióxido de carbono.

Na sequência, ocorre a acetogênese, em que os AGVs são convertidos em

acetato, hidrogênio e  $\text{CO}_2$ , compostos fundamentais para a próxima fase. Por fim, na metanogênese, arqueias metanogênicas transformam o acetato, o hidrogênio e o  $\text{CO}_2$  em metano ( $\text{CH}_4$ ) e água, resultando na produção do biogás e na estabilização final da matéria orgânica (Batstone et al., 2002).

A principal vantagem em se adotar sistemas de tratamento anaeróbio de dejetos está relacionada à produção de energia, com a obtenção do biogás. Envolve a decomposição da matéria orgânica presente no lodo em condições anaeróbicas, produzindo biogás como subproduto, o que pode ser utilizado como fonte de energia renovável (Silva, 2021). A vantagem desse método é que ele não apenas reduz o volume do lodo, mas também transforma resíduos orgânicos em uma fonte de energia limpa, enquanto o material restante pode ser utilizado como fertilizante orgânico. No entanto, o sucesso da digestão anaeróbica depende de uma série de fatores, como o tipo de lodo e as condições operacionais do processo, que devem ser ajustadas para garantir a eficiência da estabilização do material.

O biogás é formado principalmente por metano, acompanhado de uma mistura de outros gases, como dióxido de carbono, hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico e amônia (Amaral et al., 2004; Perminio, 2013). Um aspecto relevante da biodigestão anaeróbia é a estabilização química dos materiais orgânicos.

Quando resíduos orgânicos não estabilizados são descartados de forma inadequada, podem gerar odores desagradáveis, atrair vetores transmissores de doenças, como moscas e ratos, emitir gases poluentes na atmosfera e contaminar solos e aquíferos com agentes patogênicos (Sarnigausen & Nardi Júnior, 2016). Dessa forma, o ciclo de produção de biogás e biofertilizantes constitui um sistema integrado que promove a geração de energia renovável, o tratamento de resíduos orgânicos e a reciclagem e redistribuição de nutrientes.

As desvantagens da digestão anaeróbia estão, principalmente, relacionadas aos elevados custos de implementação do sistema. A instalação e a manutenção dos biodigestores, bem como a exigência de um profissional qualificado, representam um investimento inicial significativo. Além disso, o próprio processo apresenta desafios, uma vez que os microrganismos metanogênicos, essenciais para a digestão anaeróbia, são altamente sensíveis às variações de temperatura, o que torna necessário um monitoramento constante do sistema.

Figura 03: Sistema Anaeróbico



Fonte: Portal do Biogás (2025).

Em termos de impactos ambientais, um dos principais desafios é a possibilidade de contaminação do solo e das águas subterrâneas por metais pesados presentes no lodo de esgoto. Metais como chumbo, cádmio, mercúrio e zinco podem se acumular no solo e nas plantas, representando riscos para a saúde humana e para o meio ambiente (Amorim et al., 2021). Para mitigar esses riscos, é necessário que o lodo passe por processos de descontaminação, como a adição de agentes quelantes ou a filtração de metais durante o tratamento. Além disso, o monitoramento contínuo da qualidade do solo e das plantas cultivadas em áreas onde o lodo é aplicado é essencial para garantir que os níveis de metais permaneçam dentro dos limites seguros estabelecidos pela legislação ambiental.

A aplicação do lodo de esgoto também pode influenciar a microbiota do solo. Estudos indicam que a introdução de lodo tratado pode aumentar a atividade microbiana no solo, favorecendo o ciclo de nutrientes e a decomposição de matéria orgânica (Alves, 2010). No entanto, há preocupações quanto à introdução de patógenos e outros microrganismos nocivos presentes no lodo, que podem alterar negativamente a ecologia do solo. Para evitar esses impactos, o lodo deve ser submetido a tratamentos adequados, como a compostagem termofílica, que elimina grande parte dos microrganismos patogênicos, enquanto mantém ou melhora a qualidade microbiológica do solo.

Tem como principais objetivos a eliminação ou redução de agentes patogênicos, a estabilização da matéria orgânica, a diminuição do volume do lodo e a melhoria de suas características para facilitar a remoção de umidade, por meio de processos de separação sólido-líquido. Além disso, contribui para minimizar problemas relacionados a odores e à presença de vetores. Os modelos de produção sustentáveis conduzem mudanças nos sistemas tradicionais de produção, além de proporcionarem incrementos de lucro à atividade, através da geração de biogás e biofertilizante (Leitão & Silva, 2018).

De acordo com o propósito do uso da digestão anaeróbia, seja para a geração de biogás ou para a produção de biofertilizantes, é fundamental analisar a matéria-prima utilizada e o manejo adotado durante sua obtenção. Isso determinará se o produto final terá características apropriadas para aplicação no solo.

### **3.5 DESTINAÇÃO DO LODO**

De acordo com Moreira (2014), "a destinação adequada do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto é fundamental para evitar a contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas, além de permitir a reutilização desse material como fertilizante ou para recuperação de áreas degradadas, agregando valor ambiental e econômico ao processo."

Segundo a Agenda 21:

O descarte adequado de resíduos é um fator fundamental para o sucesso de um sistema de tratamento. A importância dessa prática foi reconhecida pela Agenda 21, principal instrumento aprovado na Conferência Mundial do Meio Ambiente - Rio 92, que inclui em seu Capítulo 21 o tema "Gestão Ecologicamente Correta de Resíduos Sólidos e Efluentes". Este Capítulo define quatro programas prioritários: redução da produção de resíduos, maximização da reutilização e reciclagem, promoção do armazenamento e tratamento ecológicos e, finalmente, expansão do escopo dos serviços de tratamento de resíduos.

A destinação final do lodo de esgoto é uma etapa crucial dentro da gestão de resíduos gerados nas estações de tratamento. Ela deve ser definida com base nas características físico-químicas e microbiológicas do lodo tratado, bem como nas exigências legais e ambientais. Segundo Andreoli (2001), o objetivo da destinação é minimizar os riscos à saúde pública e ao meio ambiente, garantindo que o material

tratado seja manejado de forma segura e eficiente.

### 3.5.1 Aterro Sanitário

Uma das formas mais comuns de descarte é o aterro sanitário, especialmente quando o lodo não é de qualidade suficiente para ser reutilizado. Essa prática é considerada segura, desde que o lodo seja estabilizado e desidratado previamente, o que reduz a umidade e o risco de fermentação. Segundo Von Sperling (2005), o envio de lodo para aterro sanitário requer precauções adicionais, como impermeabilização do solo e controle de infiltração, para evitar contaminação ambiental.

Assim como Von Sperling, de acordo com Metcalf & Eddy (1991), o envio do lodo a aterros sanitários demanda medidas rigorosas de proteção ambiental, como a impermeabilização do solo e o controle adequado do chorume, para evitar a contaminação do meio ambiente.

No Brasil, o uso de aterros sanitários para a disposição final do lodo de esgoto é uma prática bastante difundida, principalmente devido à sua viabilidade técnica e ao menor custo operacional em relação a outras opções disponíveis. Ao passar por processos de estabilização e desidratação, o lodo tem seu volume e os riscos biológicos consideravelmente reduzidos, o que simplifica tanto o transporte quanto a disposição final. Essa abordagem se mostra ainda mais eficiente em áreas onde já existe uma infraestrutura consolidada para o manejo de resíduos sólidos urbanos. (Andreoli et al., 2001).

**Figura 4: Aterro Sanitário**



Fonte: Uruataperá (2025).

Por outro lado, os autores destacam que o uso de aterros exige a adoção de medidas ambientais rigorosas, como a impermeabilização do solo, controle e tratamento do chorume e monitoramento contínuo das condições do solo e das águas subterrâneas. Além disso, essa alternativa contribui para o esgotamento precoce da vida útil dos aterros sanitários, o que demanda planejamento e investimentos em novos locais de disposição ou tecnologias complementares (Bettiol; Camargo, 2006).

### 3.5.2 Incineração

Uma segunda forma de destinação do lodo é a incineração, que envolve a combustão controlada do lodo em altas temperaturas, o que reduz significativamente seu volume e elimina microrganismos patogênicos. Embora essa técnica proporcione uma redução significativa de volume, ela exige grandes investimentos e um controle rigoroso das emissões atmosféricas. Souza et al. (2016) enfatizam que a incineração é mais econômica em locais com infraestrutura adequada e possibilidade de aproveitamento energético do processo.

A utilização do lodo nas aplicações agrícolas é uma opção de grande valorização devido seu potencial de reciclagem de nutrientes presentes no lodo, como nitrogênio e fósforo. A Resolução CONAMA nº 498/2020 estabelece que para a utilização desta prática deve ser obedecido alguns critérios, incluindo limites para contaminantes, metais pesados e patógenos. Borges et al. (2009) reforçam que, além de sustentável, essa alternativa contribui para a fertilidade do solo e o reaproveitamento de resíduos urbanos.

**Figura 5: Representação de uma planta de incineração de resíduos**



Fonte: H2O Engenharia (2025).

A incineração de lodo de esgoto apresenta diversas vantagens, como a redução significativa do volume final a ser descartado, a eliminação de patógenos e odores e a possibilidade de recuperação de energia. No entanto, esse processo também apresenta desvantagens significativas, como altos custos de implementação e operação, a necessidade de sistemas eficientes de controle da poluição do ar e o pré-tratamento do lodo para reduzir seu teor de umidade (Von Sperling, 2005).

### 3.5.3 Compostagem

A compostagem é uma das técnicas mais utilizadas para esse fim, pois além de reduzir os níveis de metais, também promove a estabilização da matéria orgânica presente no lodo. De acordo com (Russo, 2003) a compostagem pode ser considerada como um tratamento único da fração orgânica dos resíduos e ainda pode constituir um processo de tratamento dos resíduos sólidos, integrado num sistema de reciclagem.

Realizado por uma comunidade diversificada de microrganismos, o processo resulta na produção de água e  $\text{CO}_2$ , além da liberação de matéria orgânica que se estabiliza ao atingir a maturação. O composto maturado é um material estável, rico em matéria orgânica composta por coloides húmicos, que influenciam positivamente as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. As altas temperaturas do processo eliminam microrganismos patogênicos, permitindo o manuseio seguro do composto sem riscos ao meio ambiente (Carvalho, 2002).

Brady e Weil (2013) destacam a importância dos nutrientes essenciais no desenvolvimento das plantas. Eles explicam que o nitrogênio é fundamental para que as plantas utilizem os carboidratos; o fósforo desempenha um papel crucial nos processos de fotossíntese, fixação de nitrogênio, floração, frutificação e maturação; enquanto o potássio é indispensável para a absorção de água pelas raízes.

Grande parte dos fitopatógenos são eliminados pela exposição às temperaturas em torno de 55 °C, como por exemplo, 65 °C a 70 °C, nas primeiras 48 horas da compostagem (Hoitink & Fahy, 1963).

**Quadro 8. Métodos de compostagem e suas características**

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

Fonte: Adaptado de Inácio & Miller (2009)

Segundo Carvalho (2002), o processo consiste em combinar o lodo com um material estruturante, visando aprimorar suas características físicas e aumentar a porosidade. Essa mistura é organizada em leiras triangulares com dimensões que podem variar, que leiras são periodicamente reviradas com o auxílio de tratores específicos ou pás carregadeiras. Esse revolvimento permite a liberação dos gases gerados durante a fermentação e a introdução de ar no sistema. Por meio de processos de difusão e convecção, o material destinado à compostagem recebe o oxigênio indispensável para as reações aeróbias. Essa é a forma mais básica de descrever o sistema, que, quando bem supervisionado, resulta em um composto de alta qualidade.

O tratamento do lodo de esgoto para uso agrícola envolve diversas tecnologias, entre elas a compostagem termofílica, que é amplamente utilizada para higienizar o lodo, eliminando microrganismos patogênicos e estabilizando a matéria orgânica. Essa técnica é considerada uma das mais eficazes, pois atinge temperaturas suficientemente altas para inativar patógenos sem comprometer a qualidade do lodo (Santos, 2022). Além disso, a compostagem termofílica também promove a mineralização da matéria orgânica, aumentando a disponibilidade de

nutrientes para as plantas quando o lodo é aplicado ao solo. Isso faz com que o lodo tratado por esse método se torne uma fonte segura e eficiente de nutrientes, comparável aos fertilizantes comerciais.

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

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

Com intuito de solucionar o problema de microrganismos indesejáveis em resíduos orgânicos, adota-se a tratativa da compostagem como uma boa alternativa (Lopes-Real & Foster, 1985). A erradicação de fitopatógenos durante a compostagem se faz decorrente da inativação térmica, do efeito de produtos tóxicos, como exemplo ácidos húmicos liberados durante a compostagem ou amônia após a estabilização, ou devido à microbiostase (Pereira et al., 1996).

Brady e Weil (2013) destacam a importância dos nutrientes essenciais no desenvolvimento das plantas. Eles explicam que o nitrogênio é fundamental para que as plantas utilizem os carboidratos; o fósforo desempenha um papel crucial nos processos de fotossíntese, fixação de nitrogênio, floração, frutificação e maturação; enquanto o potássio é indispensável para a absorção de água pelas raízes.

Grande parte dos fitopatógenos são eliminados pela exposição às temperaturas em torno de 55 °C, como por exemplo, 65 °C a 70 °C, nas primeiras 48 horas da compostagem (Hoitink & Fahy, 1963).

### **3.5.4 Uso Agrícola**

O uso de lodo de esgoto na agricultura também tem sido promovido como uma estratégia eficaz para a gestão sustentável de resíduos urbanos. Em vez de destinar o lodo para aterros sanitários, onde pode causar problemas ambientais como a contaminação de solos e águas subterrâneas, sua aplicação agrícola oferece uma solução de reaproveitamento de nutrientes, contribuindo para a economia circular

(Carneiro et al., 2017). Essa abordagem não só reduz a quantidade de resíduos que precisam ser descartados em aterros, como também diminui a dependência de fertilizantes químicos, cuja produção e transporte são altamente intensivos em termos de consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa.

**Figura 6: Uso agrícola do lodo de esgoto**



Fonte: Alerta Paraná (2025).

Por ser rico em matéria orgânica e nutrientes essenciais, como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e micronutrientes, o lodo apresenta elevado potencial, permitindo a substituição parcial ou total de fertilizantes minerais em diversas culturas (Barbosa; Tavares Filho, 2006; Bettiol; Camargo, 2006).

Nos solos agrícolas, o lodo atua de forma a melhorar a fertilidade química e a qualidade física. Sua aplicação aumenta a capacidade de retenção de água, eleva a capacidade de troca catiônica (CTC) e estimula a atividade microbiana, fatores essenciais para a disponibilização gradual dos nutrientes ao longo do ciclo das culturas (Pedrosa et al., 2018). Essa liberação lenta, quando comparada aos fertilizantes minerais, garante nutrição equilibrada e reduz perdas por lixiviação.

Silva (2021) destaca que, além de melhorar a fertilidade do solo, o lodo de esgoto pode auxiliar na mitigação da erosão do solo em áreas susceptíveis a esse fenômeno. A adição de matéria orgânica aumenta a coesão entre as partículas do solo, tornando-o menos propenso a ser carregado pelas águas pluviais. Isso é particularmente importante em regiões com altos índices de precipitação, onde a erosão do solo é uma das principais causas de perda de produtividade agrícola e de

degradação ambiental. A longo prazo, a incorporação de lodo de esgoto ao solo pode contribuir para a manutenção da sustentabilidade agrícola e para a conservação dos recursos hídricos.

Apesar dos benefícios comprovados do uso agrícola do lodo de esgoto, sua aplicação não é permitida em todas as culturas. Conforme estabelece a Resolução CONAMA nº 498/2020, a utilização do lodo é vedada em culturas destinadas ao consumo cru, como hortaliças folhosas, raízes e tubérculos, ou em qualquer produção em que exista risco de contato direto do produto com o solo potencialmente contaminado. Essa restrição visa mitigar riscos à saúde pública e garantir a segurança alimentar. Nesse contexto, estudos como os de Bettiol e Camargo (2006) reforçam a necessidade de um manejo tecnicamente orientado, que siga rigorosos critérios agrônômicos, sanitários e ambientais, assegurando que o uso do lodo seja seguro, eficiente e sustentável.

Estudos brasileiros comprovam a eficácia do uso agrícola do lodo. Em áreas de milho, Barbosa e Tavares Filho (2006) registraram aumento de até 30% na produtividade e melhoria significativa na qualidade física do solo. Em cana-de-açúcar, dados da Embrapa (2020) apontam que o lodo pode reduzir em até 50% a necessidade de fertilizantes químicos, representando economia relevante para os produtores. Na silvicultura, a aplicação do lodo em plantios de *Eucalyptus spp.* proporcionou incremento de até 20% na produção de biomassa e madeira, além de ganhos nutricionais e redução de custos de adubação (Doll et al., 2023).

Em termos de benefícios ambientais, o uso do lodo de esgoto na agricultura pode ser uma ferramenta eficaz para reduzir a poluição causada pela deposição inadequada de resíduos. Estudos indicam que grande parte do lodo gerado nas ETES ainda é descartada em aterros ou cursos d'água, o que pode levar à contaminação de ecossistemas aquáticos e à proliferação de doenças (Campos et al., 2019). Ao promover a reutilização do lodo como fertilizante, evita-se o acúmulo desse resíduo em áreas sensíveis e minimiza-se o impacto ambiental associado ao seu descarte.

Do ponto de vista econômico, os resultados também são expressivos. Um levantamento realizado no Paraná entre 2011 e 2013 apontou que o aproveitamento agrícola do lodo possibilitou uma economia média de R\$ 443,28 por hectare em insumos, suprimindo mais de 80% da demanda de fósforo e nitrogênio das culturas

(SciELO, 2020). Esses dados reforçam que essa alternativa é não apenas ambientalmente vantajosa, mas também financeiramente atrativa.

Sob a ótica da sustentabilidade, o uso agrícola do lodo contribui para reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos, cuja fabricação consome grandes quantidades de energia e gera elevadas emissões de gases de efeito estufa. Além disso, essa prática se alinha diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, em especial o ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), o ODS 6 (Água Potável e Saneamento) e o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis).

Além dos benefícios agrícolas, a utilização do lodo de esgoto também pode trazer impactos positivos para o manejo integrado de resíduos sólidos urbanos. Em muitos municípios, o destino final do lodo gerado nas estações de tratamento de esgoto ainda é um desafio logístico e ambiental. O uso agrícola desse material se apresenta como uma solução prática e ambientalmente sustentável, reduzindo a necessidade de expansão de aterros sanitários e diminuindo o impacto ambiental associado à deposição inadequada de resíduos (Oliveira, 2017). A destinação correta do lodo também contribui para a economia local, já que os custos relacionados à disposição do lodo em aterros são reduzidos, e o uso desse material na agricultura pode aumentar a produtividade de culturas agrícolas essenciais.

No Brasil, a atividade é regulamentada pela Resolução nº 498/2020, que estabelece parâmetros mais rigorosos para a qualidade do lodo, limites para contaminantes, tratamento prévio obrigatório e monitoramento contínuo, garantindo segurança agrônômica, sanitária e ambiental (Brasil, 2020). Dessa forma, quando aplicada dentro dos critérios técnicos e legais vigentes, essa prática representa uma solução segura, sustentável e de grande retorno produtivo e econômico para diferentes sistemas agrícolas.

### **3.6 LEGISLAÇÃO**

No Brasil, a prática de aplicar lodo de esgoto previamente higienizado diretamente nos solos ainda não está amplamente difundida (Silveira; Matos, 2021). A regulamentação que norteia essa utilização é a atual Resolução CONAMA nº 498/2020, que estabelece procedimentos e critérios mínimos para o uso agrícola de

lodos provenientes de estações de tratamento de esgoto e seus subprodutos. Contudo, o emprego do lodo em áreas agrícolas para auxílio na produção está alinhado aos princípios de reciclagem de resíduos, conforme previsto na Lei nº 12.305, de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, o subproduto gerado pelas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) é classificado como resíduo sólido segundo a norma ABNT NBR 10.004:2004, o que impede seu descarte direto em corpos d'água superficiais ou no solo sem que seja realizado um pré-tratamento adequado (ABNT, 2004). A disposição inadequada desses resíduos configura crime ambiental conforme previsto na Lei nº 9.605, de 1998, que estabelece penalidades penais e administrativas para ações prejudiciais ao meio ambiente (Brasil, 1998). Assim, a busca por métodos sustentáveis de destinação do lodo, focados na recuperação da matéria orgânica, está em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305, de 2010 (Brasil, 2010).

Nas últimas duas décadas, a regulamentação voltada à utilização do lodo de esgoto em terras agrícolas apresentou avanços significativos, tanto no que se refere ao seu uso como matéria-prima quanto à sua aplicação direta como resíduo em áreas agrícolas. No contexto do aproveitamento como insumo agrícola, a legislação foi atualizada pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), por meio da Instrução Normativa SDA nº 61, de 8 de julho de 2020 (Mapa, 2020). Já no que se refere ao uso direto do lodo no solo, este deve seguir os parâmetros estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020, que revogou e atualizou as disposições da Resolução CONAMA nº 375, de 29 de agosto de 2006 (Brasil, 2006; 2020).

O lodo de esgoto está inserido no escopo da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, a qual define diretrizes e princípios relacionados ao manejo ambientalmente correto de resíduos e à gestão integrada em âmbito nacional. De toda forma esta política pública articula ações do governo federal buscando soluções sustentáveis para os resíduos gerados, esta ação está diretamente relacionada com os estados e municípios e setor privado que estão envolvidos diretamente no processo. (Brasil, 2010).

Entre os objetivos descritos no artigo 7º da referida lei, destaca-se o retrato

no inciso II:

*Art. 7º São objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos:*

*I - (...)*

*II - não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;*

*III - (...)*

No caso específico do lodo de esgoto, existem diversas possibilidades de reaproveitamento, incluindo aplicações na indústria, fabricação de cerâmica e tijolos, produção de cimento e agregados para construção civil, além do uso agrícola por meio da compostagem ou como fertilizante orgânico (Brasil, 2010).

De acordo com a Resolução CONAMA nº 498/2020, o bio sólido destinado à aplicação em solos deve ser classificado em duas categorias, e com base nos limites máximos permitidos de substâncias químicas presentes em sua composição.

Há também a classificação do lodo em categorias segundo seu nível de tratamento e qualidade microbiológica, definindo critérios para o uso seguro na agricultura, com destaque para as Classes A e B, que determinam restrições e cuidados distintos na aplicação do material (CONAMA, 2020, Anexo I).

Diante do apresentado a Resolução CONAMA nº 498, de 16 de dezembro de 2020, na Seção II, Art. 9º, retrata o seguinte:

*Art. 9º O bio sólido a ser destinado para uso, em solos, será classificado em Classe A ou Classe B, de acordo com os requisitos definidos neste artigo.*

*§ 1º Para que o bio sólido seja classificado como Classe A, deverá atender ao limite máximo de 103 Escherichia coli por grama de sólidos totais (g-1 de ST) e ser proveniente de um dos processos de redução de patógenos descritos na Tabela 1, com a devida demonstração de atendimento dos respectivos parâmetros operacionais.*

*§ 2º Para que o bio sólido seja classificado como Classe B, deverá atender ao limite máximo de 106 Escherichia coli por grama de sólidos totais (g-1 de ST) ou ser proveniente de um dos processos de redução de patógenos descritos na Tabela 2, com a devida demonstração de atendimento dos respectivos parâmetros operacionais.*

Portanto, a resolução deixa claro a diferenciação entre as Classes A e B, sendo este um instrumento fundamental para o manejo seguro do lodo na agricultura, estabelecendo o processo seguro para obtenção destes tipos de bioossólidos, e assim possibilitando o reaproveitamento sustentável do resíduo.

Diante do contexto brasileiro, o uso do lodo de esgoto em solos é respaldado legalmente pela Resolução nº 498 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que estabelece os critérios e diretrizes para o tratamento, beneficiamento e aplicação de bioossólidos. A presente norma, publicada em 19 de agosto de 2020, substituiu a antiga Resolução nº 375/2006, atualmente revogada, na qual amplia as possibilidades de destinação segura do lodo para uso agrícola. Diante de processos adequados de estabilização e higienização, o lodo pode ser classificado como bioossólido e utilizado para fins favoráveis no solo, desde que os parâmetros técnicos e ambientais definidos na legislação sejam atendidos. (Brasil, 2020).

Na tabela 9 apresentada abaixo, é possível observar os valores máximos permitidos que são rígidos e não podem ser ultrapassados em nenhuma das amostras avaliadas, garantindo assim a segurança ambiental e a proteção da saúde pública no uso do material (Brasil, 2020).

**Tabela 9. Valores máximos permitidos de metais no bioossólido a ser destinado para uso, em solos**

Substâncias Químicas	Valor Máximo permitido no bioossólido (mg/kg-1 ST)	
	Classe A	Classe B
Arsênio	41	75
Bário	1300	1300
Cádmio	39	85
Chumbo	300	840
Cobre	1500	4300
Cromo	1000	3000
Merúrio	17	57
Molibdênio	50	75
Níquel	420	420
Selênio	36	100
Zinco	2800	7500

Fonte: Resolução CONAMA nº 498/2020

Essa mesma resolução CONAMA estabelece uma série de exigências relacionadas ao uso do bioossólido, incluindo o processo de licenciamento da Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL), a periodicidade do monitoramento da qualidade do



material e as condições adequadas para o seu manuseio, transporte e aplicação. Além disso, a norma define critérios técnicos para as culturas e áreas agrícolas que podem receber o bio sólido, impõe restrições locais, orienta sobre o cálculo da dose a ser aplicada e determina a necessidade de monitoramento contínuo das áreas onde o material é utilizado (Brasil, 2020).

Tal Resolução atualiza as normas para o uso agrícola do lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto, o lodo de esgoto somente poderá ser utilizado na agricultura desde que atendido os limites máximos para microrganismos indicadores de contaminação fecal, bem como para ovos viáveis de helmintos CONAMA (2020). Tal autorização pode ser dada por órgão ambiental competente, mediante decisão fundamentada.

A norma, CONAMA (2020) estabelece regras claras para o licenciamento, monitoramento, transporte e aplicação do lodo tratado, além de definir quais culturas e áreas podem receber esse material. Também aponta restrições de localização e orienta sobre como calcular a quantidade adequada a ser aplicada, sempre com o objetivo de proteger a saúde das pessoas e o meio ambiente.

O uso do lodo só é permitido quando ele atende aos limites máximos para certos microrganismos, como coliformes fecais e ovos de helmintos, garantindo a qualidade do produto e evitando riscos de contaminação.

De acordo com Martins, et al (2015) os vírus presentes nos bio sólidos constituem um importante risco à saúde pública, pois podem persistir por períodos prolongados no ambiente e serem transmitidos pelo contato com solos ou culturas irrigadas com esses materiais. Dessa forma, é fundamental que o tratamento aplicado aos bio sólidos seja capaz de reduzir eficazmente a carga viral, assegurando a segurança no seu uso na agricultura.

No que tange aos vírus, a resolução estabelece que o lodo deve passar por tratamentos que garantam a redução significativa dos agentes patogênicos, incluindo vírus entéricos, através de processos como digestão anaeróbia, compostagem termofílica ou outros métodos equivalentes capazes de assegurar a segurança sanitária (CONAMA, 2020).

Para que o bio sólido possa ser utilizado em solos, ele precisa cumprir pelo menos um dos critérios que reduzem a atração de vetores, conforme a tabela 10.

**Tabela 10. Taxa máxima anual e carga máxima acumulada de substâncias químicas em solos quando do uso de bio sólido Classe 2.**

Substâncias químicas	Taxa máxima anual (kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	Carga máxima acumulada (kg ha <sup>-1</sup> )	
		Solos de áreas degradadas	Solos de áreas não degradadas
Arsênio	2	20	41
Bário	13	130	260
Cádmio	1,9	19	39
Cromo	150	1500	3000
Cobre	75	750	1500
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	1400	2800

Fonte: Resolução CONAMA nº 498/2020

### 3.6.1 Aplicação Sustentável

A utilização do lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) na agricultura vem ganhando destaque nas últimas décadas como uma prática sustentável, especialmente em um cenário de crescente demanda por soluções que integrem produção agrícola e preservação ambiental. O lodo de esgoto é o principal subproduto do tratamento de águas residuais e contém elevados níveis de matéria orgânica e nutrientes, como nitrogênio e fósforo, que são essenciais para o crescimento das plantas (Silva et al., 2016).

A aplicação do lodo deve ser realizada de acordo com o calendário agrícola das culturas escolhidas, e o desenvolvimento das plantas foi monitorado durante todo o ciclo de crescimento. São avaliados parâmetros como a germinação, o crescimento vegetativo, a produtividade e a qualidade dos grãos ou frutos produzidos. Além disso, análises periódicas do solo são realizadas para monitorar a disponibilidade de nutrientes e a concentração de metais pesados ao longo do tempo (Silva, 2015).

Após o término do ciclo de cultivo, os dados obtidos são analisados em conjunto com os resultados laboratoriais, permitindo uma análise comparativa entre os diferentes tratamentos de lodo e o fertilizante convencional. Os resultados são interpretados à luz da literatura existente, buscando-se identificar as principais vantagens e limitações da aplicação do lodo de esgoto em solos agrícolas, conforme discutido por Carneiro et al. (2017). O uso de lodo de esgoto na agricultura também é

avaliado sob a perspectiva da sustentabilidade econômica. São realizados cálculos de custo-benefício para comparar os custos associados ao tratamento e à aplicação do lodo com os custos dos fertilizantes químicos convencionais. Os resultados indicam que, em muitos casos, o uso de lodo tratado pode ser economicamente viável, especialmente em regiões onde o custo dos fertilizantes é elevado (Silva, 2015).

É possível realizar análises estatísticas de dados com o objetivo de identificar a relação entre as doses de lodo aplicadas e os parâmetros avaliados. Os resultados são comparados com aqueles obtidos em parcelas controle, onde são utilizados fertilizantes químicos convencionais. A metodologia de comparação é baseada em estudos anteriores, que indicam que o lodo de esgoto pode proporcionar efeitos semelhantes ou superiores aos fertilizantes químicos, desde que tratado e aplicado de maneira adequada (Carneiro et al., 2017).

Além de efeitos sobre o desenvolvimento das plantas, se faz possível a realização de uma avaliação do impacto ambiental da aplicação do lodo de esgoto. O monitoramento da qualidade da água subterrânea deve ser realizado em pontos de coleta próximos às áreas experimentais, com o objetivo de identificar possíveis contaminações por metais pesados ou nutrientes lixiviados do solo. Conforme mencionado por Amorim et al. (2021), um dos principais riscos associados à aplicação de lodo de esgoto é a contaminação de aquíferos, especialmente em áreas com alta pluviosidade ou solos permeáveis.

A reciclagem desses nutrientes por meio da aplicação do lodo em solos agrícolas apresenta uma alternativa promissora ao uso de fertilizantes químicos, cujo uso excessivo tem sido associado a impactos ambientais negativos, como a contaminação de lençóis freáticos e a degradação do solo. No entanto, a adoção dessa prática requer um rigoroso controle de qualidade, já que o lodo também pode conter contaminantes perigosos, como metais pesados e patógenos, que, se não tratados adequadamente, podem representar riscos tanto ao meio ambiente quanto à saúde humana.

Diversos estudos demonstram que o uso controlado de lodo de esgoto pode trazer inúmeros benefícios ao solo, especialmente em áreas agrícolas que sofrem com a degradação de nutrientes devido ao cultivo intensivo. De acordo com Carneiro et al. (2017), a aplicação de lodo tratado pode aumentar a capacidade de retenção de água

do solo, melhorar sua estrutura física e promover o desenvolvimento das culturas. No entanto, é necessário que o lodo seja submetido a processos de tratamento específicos para a remoção de patógenos e a redução de contaminantes antes de sua aplicação agrícola.

Técnicas como a compostagem e a digestão anaeróbica são frequentemente empregadas para garantir que o lodo seja seguro para o uso em solos destinados à produção de alimentos. Essas técnicas não apenas reduzem a presença de organismos patogênicos, como também mantêm ou aumentam a concentração de nutrientes essenciais, potencializando os benefícios agrônômicos do lodo (Campos et al., 2019).

### **3.6.2 Melhoria no Solo e Produção**

Além de sua função como fertilizante, o lodo de esgoto pode atuar como um melhorador do solo, promovendo o incremento de matéria orgânica e contribuindo para a estabilização da estrutura do solo. Isso é especialmente importante em regiões onde o solo é pobre em matéria orgânica, como em muitas áreas agrícolas do Brasil (Silva, 2015).

O aumento da matéria orgânica favorece a retenção de umidade e a capacidade do solo de suportar ciclos repetidos de cultivo sem perder sua fertilidade. Ademais, Carneiro et al. (2017) ressaltam que a utilização de lodo de esgoto pode contribuir para a reabilitação de solos degradados, proporcionando uma recuperação gradual da sua capacidade produtiva. Essa prática, quando bem controlada, permite que áreas antes consideradas improdutivas voltem a ser exploradas, reduzindo a necessidade de abertura de novas áreas agrícolas e, conseqüentemente, a pressão sobre ecossistemas naturais.

Os benefícios do lodo de esgoto, quando devidamente tratado, incluem o aumento da produtividade agrícola, principalmente em culturas que demandam altos teores de nutrientes, como milho, soja e trigo.

Segundo estudos de a aplicação de lodo de esgoto tratado em solos agrícolas pode aumentar significativamente o rendimento das culturas, com efeitos semelhantes aos observados com o uso de fertilizantes químicos convencionais. No entanto, diferentemente dos fertilizantes sintéticos, que geralmente fornecem nutrientes de

forma imediata, o lodo de esgoto promove uma liberação gradual de nutrientes, o que pode favorecer o desenvolvimento das plantas ao longo do ciclo de crescimento, evitando picos de saturação que poderiam causar danos às raízes ou lixiviação de nutrientes.

A legislação ambiental brasileira, por meio de normas como a Resolução CONAMA n.º 498/2020, estabelece critérios rigorosos para o uso de lodo de esgoto na agricultura, determinando parâmetros para a concentração de metais pesados e patógenos no lodo que será aplicado ao solo. De acordo com essa legislação, o lodo deve passar por tratamentos específicos para assegurar que sua aplicação não represente riscos ao ambiente ou à saúde pública. A regulamentação também exige a realização de monitoramentos periódicos tanto do lodo quanto do solo onde ele é aplicado, garantindo que a qualidade do solo seja mantida e que não ocorra a contaminação de aquíferos ou a bioacumulação de metais pesados nas plantas cultivadas (Santos, 2022).

Toda análise incluiu recomendações para a implementação de políticas públicas que incentivem a adoção dessa prática, bem como sugestões para futuras pesquisas sobre o tema (Campos et al., 2019).

#### **4 ACEITAÇÃO PÚBLICA**

A aceitação pública e a percepção dos produtores rurais em relação ao uso de lodo de esgoto como fertilizante, muitos agricultores ainda demonstram resistência em adotar essa prática, principalmente devido à falta de informações claras sobre os benefícios e os riscos envolvidos (Alves, 2010).

Tem-se a necessidade de realizar um estudo sobre a aceitação dos produtores rurais em relação ao uso de lodo de esgoto como fertilizante. Para isso, são aplicados questionários estruturados a agricultores daquela região, com o objetivo de avaliar suas percepções sobre os benefícios e os riscos associados ao uso de lodo tratado (Santos, 2022). Os dados coletados são analisados de forma qualitativa, identificando as principais barreiras e incentivos à adoção dessa prática agrícola.

Para reverter esse cenário, é essencial que campanhas de conscientização e programas de extensão rural sejam implementados, tais ações desempenham um papel fundamental na disseminação de informações e no treinamento de produtores,

obtendo vantagens do uso seguro e controlado do lodo de esgoto na agricultura (Oliveira, 2017). Além disso, a divulgação de resultados científicos que comprovem a segurança e a eficiência dessa prática pode ajudar a aumentar a confiança dos agricultores e a incentivar a adoção dessa tecnologia em larga escala.

A aplicação do lodo de esgoto como insumo agrícola também pode ser uma solução eficaz para o combate à desertificação em regiões semiáridas. O lodo, por ser rico em matéria orgânica, pode aumentar a capacidade de retenção de água no solo e melhorar sua estrutura, facilitando o desenvolvimento de culturas em áreas com baixa disponibilidade de água (Santos, 2022). Em regiões do semiárido brasileiro, onde a desertificação é um problema crescente, a utilização de lodo de esgoto tratado pode se tornar uma estratégia importante para a recuperação de áreas degradadas e para o aumento da produção agrícola, contribuindo para a segurança alimentar local e a sustentabilidade ambiental.

**Figura 7: leiras de deposição do lodo**



Fonte: Terra Ambiental (2025).

Embora os benefícios econômicos e ambientais dessa prática sejam amplamente reconhecidos, a percepção pública em relação ao uso de resíduos de esgoto como fertilizantes ainda é negativa em muitos casos. Muitos agricultores e consumidores demonstram resistência à ideia de utilizar produtos que foram fertilizados com lodo de esgoto, devido a preocupações com a segurança alimentar e

o risco de contaminação (Silva, 2021). Para superar essa barreira, é fundamental que sejam desenvolvidas campanhas educativas que expliquem os processos de tratamento do lodo e os benefícios de seu uso controlado, além de destacar os resultados positivos de estudos científicos que comprovam a segurança dessa prática.

Apesar dos benefícios, o uso de lodo de esgoto na agricultura ainda enfrenta barreiras técnicas e legais. A regulamentação vigente no Brasil, como a Resolução CONAMA n.º 498/2020, estabelece diretrizes claras para o tratamento e a aplicação do lodo, mas muitos produtores ainda desconhecem os detalhes dessas normativas ou enfrentam dificuldades na adaptação de suas práticas agrícolas para incluir o uso desse insumo (Oliveira, 2017). Além disso, há uma necessidade crescente de estudos que avaliem o impacto a longo prazo da aplicação do lodo em diferentes tipos de solo e culturas, especialmente em relação à bioacumulação de metais pesados e à manutenção da fertilidade do solo.

Um ponto relevante é o potencial econômico do uso do lodo de esgoto como fertilizante. A substituição parcial ou total de fertilizantes químicos por lodo tratado pode gerar economias significativas para os produtores rurais, especialmente em um cenário de alta nos preços dos insumos agrícolas (Silva, 2021). Além disso, o uso do lodo pode contribuir para a criação de um ciclo produtivo mais sustentável, em que os resíduos urbanos são transformados em recursos valiosos para a agricultura, promovendo a economia circular e a redução de impactos ambientais associados à produção de fertilizantes sintéticos.

A obtenção de um insumo de alta qualidade, a assistência técnica aos usuários e o acompanhamento contínuo da aplicação são elementos essenciais para assegurar a eficiência e a sustentabilidade de um programa de reciclagem de lodo na agricultura. A manutenção da qualidade do lodo influencia diretamente a aceitação pública e a confiança dos produtores rurais. O suporte ao agricultor garante que o meio ambiente, assim como a saúde humana, animal e vegetal, seja protegido contra riscos desnecessários.

A falta de cuidado em qualquer fase do processo pode comprometer essa alternativa, devido às possíveis resistências da sociedade, originadas por riscos ambientais, agronômicos ou sanitários. Dessa forma, o Plano de Reciclagem Agrícola de Lodo de Esgoto funciona como uma ferramenta para organizar e aprimorar as

operações relacionadas à aplicação do lodo na agricultura, considerando fatores como viabilidade econômica, disponibilidade de áreas, impactos sociais e diretrizes agrônômicas para seu uso adequado.

Por fim, a adoção de tecnologias inovadoras para o tratamento do lodo de esgoto, como a combinação de processos biológicos e químicos, pode aumentar a eficiência da reciclagem de nutrientes e minimizar os riscos associados à contaminação (Campos et al., 2019). Pesquisas nessa área continuam a avançar, com o objetivo de desenvolver novos métodos de tratamento que sejam mais eficientes, economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis. O futuro da utilização do lodo de esgoto na agricultura depende do desenvolvimento contínuo de tecnologias e da implementação de políticas públicas que incentivem a adoção dessa prática em larga escala.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo evidencia que a utilização do lodo de estação de tratamento de esgoto na agricultura constitui uma prática alinhada aos princípios da sustentabilidade, combinando viabilidade econômica e segurança ambiental. Essa prática se destaca pelo elevado teor de nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio, que conferem ao lodo potencial para substituir, parcial ou totalmente, fertilizantes químicos convencionais, oferecendo uma alternativa ecologicamente responsável diante do aumento dos custos e da crescente demanda por sistemas agrícolas mais sustentáveis.

A incorporação do lodo ao solo promove a melhoria da fertilidade e a recuperação de áreas degradadas, elevando os teores de matéria orgânica e a capacidade de retenção hídrica. Esses efeitos contribuem para o fortalecimento da resiliência dos ecossistemas agrícolas, especialmente em regiões submetidas a condições adversas, como períodos de estiagem ou manejo inadequado do solo.

Do ponto de vista produtivo, a aplicação de lodo tratado favorece a liberação gradual de nutrientes, o que otimiza sua absorção pelas plantas e assegura maior estabilidade na produção ao longo do ciclo de cultivo. Todavia, a variabilidade na composição do lodo entre diferentes estações de tratamento exige a adoção de



processos padronizados e monitoramento rigoroso, garantindo a segurança e a eficiência do material aplicado.

Adicionalmente, a padronização e a eficácia dos processos de tratamento são essenciais para assegurar a eliminação de patógenos e a qualidade uniforme do lodo, viabilizando sua aplicação em larga escala. A maximização dos benefícios dessa prática depende de uma abordagem integrada, que considere tecnologias adequadas, políticas públicas consistentes, monitoramento ambiental contínuo e capacitação dos agricultores, consolidando a utilização do lodo de esgoto como estratégia sustentável para a agricultura contemporânea.

## 6 REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10.004: **Resíduos sólidos – Classificação**, Rio de Janeiro, RJ, 71p.

ANDREOLI, Carlos V.; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fabiano. **Lodo de esgoto: tratamento e disposição final**. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

ALERTA PARANÁ. Uso do lodo de esgoto na agricultura promove sustentabilidade ambiental. *Alerta Paraná*, Cascavel, 30 nov. 2018. Disponível em: <https://www.alertaparana.com.br/noticia/1811/uso-do-lodo-de-esgoto-na-agricultura-promove-sustentabilidade-ambiental>. Acesso em: 26 ago. 2025.

ALVES, F. L. F. **Utilização de biossólido de cervejaria como substrato para produção de mudas de eucalipto: tratamento inicial dos resíduos e efeitos ambientais**. Revista de Engenharia Florestal, 2010.

AMARAL, C. M. C. do.; AMARAL, L. A. do; JUNIOR, J. de L; NASCIMENTO, A. A.; FERREIRAS, de S. D.; MACHADO, M. R. F. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica**. Revista Ciência Rural, Santa Maria, v. 34, n.6, 2004.

AMORIM, D.; DALBI, A.; TESSARO, A. A. **Químicas e microbiológicas do lodo de esgoto produzido pela Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Toledo-Paraná**. Revista de Engenharia Ambiental, 2021.

APPELS, L. et al. *Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge*. Progress in Energy and Combustion Science, v. 34, n. 6, p. 755-781, 2008.

BARBOSA, G. M. C.; TAVARES FILHO, J. Uso agrícola do lodo de esgoto: aspectos agrônômicos e ambientais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 4, p. 911–920, 2006.

BASTOS, R. K. X.; HERNANDEZ, I. R. Lagoas de estabilização. In: SPERLING, M. (Org.). **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

BATSTONE, D. J. et al. *Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)*. IWA Publishing, 2002.

BETTIOL, Wagner; CAMARGO, Orlando A. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Orgs.). **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. p. 25–36.

BUNTING, J. A.; LINDEN, D. R.; AYUSO, M.; CARVALHO, C.; BARRAL, M. **Uso de lodo de esgoto como fonte de nutrientes: avaliação da necessidade de**

**complementação de potássio.** *Revista de Agricultura e Meio Ambiente*, v. 36, n. 2, p. 154–160, 1992.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos.** 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013, 704p.

BRANDÃO, N. L.; CRUZ, M. C. **Manejo do solo e nutrição de plantas.** 2. ed. São Paulo: Editora Agronômica, 2015. 320 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Agenda 21 brasileira: bases para discussão.** Brasília: MMA/SDS, 2000. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/sds/agenda21/index.htm>. Acesso em: [coloque a data de acesso].

BRASIL (2010). Lei 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.** Diário Oficial da União, Brasília, seção 1, p. 3

BRASIL (2020). Lei n. 14.026, de 15 de julho de 2020. **Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000.** Brasília, DF: Presidência da República, 2020a. Disponível em: 70 [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm). Acesso em: 07 mar. 2023.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2020.

**BRASIL.** Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. **Manual para o manejo e a utilização do lodo de estação de tratamento de esgoto.** Brasília: MMA, 2006.

CAMPOS, R. F.; CAMPOS, M. J. **Análise de áreas agrícolas para disposição do lodo proveniente da estação de tratamento de esgotos de Tijucas-SC.** *Revista de Engenharia Ambiental*, 2019.

CARNEIRO, T. R.; BOECHAT, I. G.; COSTA, P. L. L. **Lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) e compostagem orgânica em cultivo de mudas nativas: estudo na região dos lagos RJ-Brasil.** *Revista Internacional de Ciências Ambientais*, 2017.

CARVALHO, A. H. de O. **Uso agrícola de lodo de esgoto: potencialidades e riscos.** *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 38, p. 1–12, 2015.

CARVALHO, C. S. et al. **Composição química da matéria orgânica de lodos de esgoto.** *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 10, n. 3, p. 413-419, set. 2015.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; reatores anaeróbios**. 1ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, v. 5, 1997.

DOLL, C. C. et al. **Aplicação de lodo de esgoto em plantios de eucalipto: impactos na produção de biomassa e na nutrição do solo**. Revista *Árvore*, v. 47, e470204, 2023.

EMBRAPA. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2007.

EMBRAPA. **Aproveitamento agrícola do lodo de esgoto em cana-de-açúcar**. Brasília, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 26 ago. 2025.

EUROPEAN UNION. *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*. Official Journal of the European Communities, L181, p. 6–12, 1986.

GOBBI, M. A. (2003). **Pontencialidade do uso do lodo de esgoto como fonte de macronutrientes no cultivo do milho (Zea mays L.) no município de Maringá - PR** [Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)]. Faculdade de Ciências Agrônomicas. Universidade Estadual Paulista. Botucatu.

GRANDIN, A.; NOLASCO, M. A.; DI BERNARDO, L. Caracterização de lodos de estações de tratamento de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 2, n. 1, p. 5-12, 1993.

HOITINK, H.A.J.; FAHY, P.C. **Technique for isolating *Pythium aphanidermatum* from soil**. , v.53, p. 727-728, 1963

H2O ENGENHARIA. **Aproveitamento e destinação do lodo**. Disponível em: <https://h2oengenharia.com.br/pt/aproveitamento-e-destinacao-do-lodo/>. Acesso em: 26 ago. 2025.

IMHOFF, K. R. Desenvolvimento das Estações de Tratamento de Esgotos. In: **Manual de tratamento de águas residuárias**, São Paulo, cap. 2, p. 127-129. 1986.

NÁCIO, Caio Teves; MILLER, Paul R. M. Capítulo 3 – Métodos de Compostagem. In: **Compostagem: ciência e prática para gestão de resíduos orgânicos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. *Tratamento de esgotos domésticos*. 7. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011.

LEITÃO, F. O.; DA SILVA, W. H. **Geração de energia e renda a partir do tratamento dos resíduos da suinocultura**. Informe Gepec., 22:116-132, 2018.

MAPA (2020). **Instrução Normativa nº. 61, de 08 de julho de 2020**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Diário Oficial, Seção 1, p.5.

MARTINS, M. C. R.; SOUZA, T. R. **Vírus em biossólidos: características, riscos e tratamentos**. Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 20, n. 3, p. 321-330, 2015.

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

METCALF e EDDY. **Desind of Facilities for the Treatment and Disposal of Sludge**. In: **Wastewater Engineering**. New York, Mc Graw - Hill, 1991.

OLIVEIRA, S. B. de. **Termofílica para tratamento do lodo gerado em estação de tratamento de esgoto visando à reciclagem agrícola**. Revista de Saneamento, 2017.

PEDROSA, E. M. R. et al. Lodo de esgoto e suas implicações na fertilidade e qualidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 128–134, 2018.

PEREIRA NETO, J. T. (2007). **Manual de compostagem: processo de baixo custo**. UFV.

PEREIRA, J.C.R.; ZAMBOLIM, L.; do VALE, F.X.R.; CHAVES, G.R. **Compostos orgânicos no controle de doenças de plantas**. Revisão anual de patologia de plantas, v.4, p.353-379, 1996.

PERMINIO, G. B. **Viabilidade do uso de biodigestor como tratamento de efluentes domésticos descentralizado**. 2013. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Formas Alternativas de Energia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

PORTAL DO BIOGÁS. *Biodigestor anaeróbio*. Disponível em: <https://portaldobiogas.com/biodigestor-anaerobio/>. Acesso em: 26 ago. 2025.

REIS MFP. **Avaliação do processo de compostagem de resíduos sólidos urbanos** [tese] Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS; 2005. 239p.

RUSSO MAT. **Tratamento de resíduos sólidos.** Universidade Federal de Pernambuco, 2003. Disponível a partir de: <http://homepage.ufp.pt/madinis/RSol/Web/TARS.pdf>

SANTOS, M. dos. **Utilização de lodo de esgoto na agricultura.** Revista Brasileira de Gestão Ambiental, vol. 9, n. 1, p. 1–8, fev. 2015.

SANTOS, S. G. **Estudo de cenários para o uso do lodo produzido na estação de tratamento de esgoto de Canasvieiras, Florianópolis, SC.** Revista de Engenharia Ambiental, 2022.

SARNIGHAUSEN, V. C. R.; NARDI JUNIOR, G. **Potencial de produção de metano em sistemas de tratamento e de biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos.** Tekhne e Logos, Botucatu, v.7, n.2, 2016.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO – SAAE ITABIRA. Tratamento de esgoto. Disponível em: <https://www.saeitabira.com.br/tratamento-de-esgoto>. Acesso em: 26 ago. 2025.

SILVA, M. A. **Lodo de esgoto como insumo para produção de mamona.** Embrapa, 2015.

SILVA, F. M. **Caracterização e estudo da aplicação e valoração de lodo de estação de tratamento de esgoto.** Revista de Saneamento, 2021.

SILVA, M. T. da; KOHLER, H. dos S.; ARRUDA, S. A. **Utilização de lodo de estação de tratamento de esgoto como insumo para produção agrícola.** Revista de Jornada. 2018.

SILVEIRA, L. S., ; Matos, S. M. S. (2021). **Saneamento básico como direito humano fundamental. Direito Ambiental e Sociedade**, 11(3), 105–124. <https://doi.org/10.18226/22370021.v11.n3.05>

SOCCOL, V.T.; PAULINO, R.C. **Riscos de contaminação do agroecossistema com parasitos pelo uso do lodo de esgoto.** In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p.245-259., 2016.

SOCCOL, C. R.; PAULINO, R. C. **Parasitos e a utilização de lodo de esgoto em agricultura.** *Revista de Saúde Pública*, São Paulo, v. 34, n. 6, p. 587-592, 2000.

SOUZA, T. S. et al. **Gestão de lodo de esgoto sanitário: situação e desafios no Brasil.** *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 3, p. 457–466, 2016.

**SOUZA, C. F.; VON SPERLING, M.** *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2013.

**SPERLING, M.** **Fundamentos do tratamento de esgotos: princípios do tratamento biológico**. 3. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2005.

SCIELO. Uso agrícola do lodo de esgoto: impactos econômicos em culturas agrícolas no Paraná (2011–2013). **SciELO Brasil**, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br>. Acesso em: 26 ago. 2025.

SHAO, L.; WANG, T.; LI, T.; LÜ, F.; HE, P. **Comparison of sludge digestion under aerobic and anaerobic conditions with a focus on the degradation of proteins at mesophilic temperature**. *Bioresource Technology*, 140:131-137, 2013.

**SHAMMAS, N.K.; WANG, L.K.** Aerobic Digestion. In: WANG, L. K.; SHAMMAS, N. K.; HUNG, Y. T. (eds) **Biosolids Treatment Processes**. Handbook of Environmental Engineering, vol 6. Humana Press, 2007.

**TERRA AMBIENTAL**. 5 resíduos que podem ser compostados e você não sabia! *Blog da Tera Ambiental*, São Paulo, 20 jan. 2014. Disponível em: <https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/bid/370496/5-res-duos-que-podem-ser-compostados-e-voc-n-o-sabia>. Acesso em: 26 ago. 2025.

**TSUTIYA, M. T.** **Lodo de esgoto: tratamento e disposição final**. São Paulo: ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.

**URUATAPERA**. *Impasse na questão do lixo metropolitano*. Disponível em: <https://uruatapera.com/impasse-na-questao-do-lixo-metropolitano/>. Acesso em: 26 ago. 2025.

VON Sperling, M. (2005). **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. (3a). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG. Princípios de tratamento biológico de águas residuárias. v1.

**VON SPERLING, M.** *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2014.

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

WEF – Water Environment Federation: **Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants, Manual of Practice**. No. 11, Volume III: Solids Processes, Sixth Edition, Chapter 31 Aerobic Digestion. 2007.



WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater*. Volume 4: *Excreta and greywater use in agriculture*. Geneva: WHO, 2006. Disponível em: [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/wastewater/gsuweg4/en/](https://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/gsuweg4/en/). Acesso em: 25 ago. 2025.

XU, G. (2014). **Analysis of Sewage Sludge Recovery System in EU-in Perspectives of Nutrients and Energy Recovery Efficiency, and Environmental Impacts**. Norwegian University of Science and Technology.