



UFOP



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas – Departamento de Engenharia Ambiental

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

---



**Lucas Augusto Pedroso Coelho**

**O LODO DE ESGOTO SANITÁRIO E A SUA  
APLICABILIDADE NA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS  
DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO**

Ouro Preto

2023

O Lodo de esgoto sanitário e a sua aplicabilidade na recuperação de áreas degradadas pela mineração

Lucas Augusto Pedroso Coelho

Trabalho Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Ambiental na Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 28/03/2023

Área de concentração: Engenharia Ambiental

Orientador: Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Sandra Aparecida Lima de Moura – UFOP

Ouro Preto

2023

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C672l Coelho, Lucas Augusto Pedroso.  
O lodo de esgoto sanitário e a sua aplicabilidade na recuperação de áreas degradadas pela mineração. [manuscrito] / Lucas Augusto Pedroso Coelho. - 2023.  
68 f.: il.: color., tab.. + Quadro.

Orientadora: Profa. Dra. Sandra Aparecida Lima de Moura.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .

1. Degradação ambiental - Recuperação. 2. Minas e recursos minerais. 3. Esgoto - Lodo. 4. Águas residuais - Purificação - Tratamento biológico - Biossólido. I. Moura, Sandra Aparecida Lima de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 502:504

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Lucas Augusto Pedroso Coelho**

### O LODO DE ESGOTO SANITÁRIO E A SUA APLICABILIDADE NA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental

Aprovada em 28 de março de 2023

#### Membros da banca

Dr<sup>a</sup>. - Sandra Aparecida Lima de Moura - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP)

Dr<sup>a</sup>. - Marina de Medeiros Machado (Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP)

Dr. - Aníbal da Fonseca Santiago (Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP)

Dr<sup>a</sup>. Sandra Aparecida Lima de Moura, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 06/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Sandra Aparecida Lima de Moura, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/04/2023, às 15:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0505438** e o código CRC **FC14E010**.

*Dedico este trabalho a todos que contribuem para práticas de mineração mais sustentáveis.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado sabedoria, paciência e força para concluir esta etapa.

Aos meus pais, José Geraldo e Mariléa, por não medirem esforços para que eu pudesse alcançar todos os meus objetivos e por tornarem mais fácil a minha caminhada.

À minha irmã, Lorene, pelo companheirismo de sempre.

À Natália, por todo amor, carinho e por ser fundamental neste momento.

À minha orientadora Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Sandra Aparecida Lima de Moura pela dedicação, paciência e suporte para a realização deste trabalho.

Aos funcionários da HB Locações por terem me recebido de braços abertos e pelos ensinamentos repassados.

Às amigadas construídas em Ouro Preto, em especial aos amigos de curso, os quais tornaram a graduação mais leve.

A todos os professores da Engenharia Ambiental pelo conhecimento transmitido.

À Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, pelo ensino gratuito e de qualidade.

## RESUMO

O desenvolvimento minerário provoca inúmeras alterações físicas e químicas nos solos. Como forma de compensar tais alterações, há um surgimento de novos métodos de recuperação de áreas degradadas. Rico em nutrientes, o bissólido, um produto proveniente do tratamento do lodo de esgoto sanitário advindo das estações de tratamento de esgoto, é uma nova alternativa estudada para a recuperação de áreas degradadas. Sendo assim, o presente trabalho tem por objetivo avaliar, por meio de um levantamento bibliográfico, a aplicabilidade do lodo de esgoto sanitário como alternativa ao solo de cobertura de áreas degradadas pela mineração. A metodologia aplicada neste trabalho se baseou em analisar e comparar diversos estudos já realizados acerca da aplicação do lodo de esgoto sanitário, coletado em estações de tratamento de esgoto, no auxílio à recuperação de áreas degradadas. A investigação se deu por meio de revisão literária, de artigos científicos, trabalhos acadêmicos e das legislações pertinentes. Para isso, foram realizadas análises das características físicas e químicas do lodo de esgoto sanitário, das propriedades físicas e químicas do solo após a sua aplicação, e por fim, da viabilidade de se implementar esse método de recuperação nas áreas degradadas pela mineração. É esperado no presente trabalho que, aliado a uma nova alternativa de disposição final do lodo de esgoto sanitário, seja possível contribuir para a proposição experimental do uso desse resíduo como estratégia para cobertura e recomposição da camada fértil superficial do solo para que futuras pesquisas de recuperação ambiental nas áreas degradadas pela mineração possam ser viabilizadas.

**Palavras-chave:** Recuperação de áreas degradadas, Mineração, Lodo de esgoto sanitário, Biossólido.

## ABSTRACT

Mining development causes numerous physical and chemical changes in soils. As a way of compensating for such alterations, new methods of restoring degraded areas have emerged. Rich in nutrients, biosolids, a product derived from the treatment of sanitary sewage sludge from sewage treatment plants, is a new alternative being studied for the restoration of degraded areas. Therefore, the present work aims to evaluate, through a literature review, the applicability of sanitary sewage sludge as an alternative to soil cover in areas degraded by mining. The methodology applied in this study was based on analyzing and comparing various studies already conducted on the application of sanitary sewage sludge, collected from sewage treatment plants, to aid in the restoration of degraded areas. The investigation was carried out through a literary review of scientific articles, academic papers, and relevant legislation. For this purpose, analyses were carried out on the physical and chemical characteristics of the sanitary sewage sludge, the physical and chemical properties of the soil after its application, and finally, the feasibility of implementing this restoration method in areas degraded by mining. It is expected in this study that, combined with a new alternative for the final disposal of sanitary sewage sludge, it will be possible to contribute to the experimental proposition of using this waste as a strategy for covering and restoring the superficial fertile layer of soil, so that future environmental restoration research in areas degraded by mining can be made possible.

**Keywords:** Recovery of degraded areas. Mining. Sanitary sewage sludge. Biosolid.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1</b> – Lodo de ETE acondicionado no leito de secagem. ....     | 6  |
| <b>Figura 2</b> – Fluxograma de execução da recuperação ambiental. ....   | 20 |
| <b>Figura 3</b> – Fluxograma metodológico da elaboração do trabalho. .... | 27 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1</b> – Valores máximos permitidos de substâncias químicas no bioossólido a ser destinado para uso, em solos.....  | 13 |
| <b>Tabela 2</b> – Taxa máxima anual e carga máxima acumulada de substâncias químicas em solos quando do uso de bioossólido Classe 2. ....                                | 14 |
| <b>Tabela 3</b> – Valores considerados para o cálculo da taxa de aplicação de bioossólido. ....  | 30 |
| <b>Tabela 4</b> – Concentração de elementos químicos em lodos de ETEs e suas restrições de uso. ....   | 33 |
| <b>Tabela 5</b> – Concentrações teóricas de substâncias inorgânicas incorporadas ao solo através da aplicação do lodo de esgoto sanitário. ....                          | 34 |
| <b>Tabela 6</b> – Porcentagens de elementos químicos presentes no lodo de esgoto sanitário utilizado nos experimentos. ....  | 35 |
| <b>Tabela 7</b> – Composição química do lodo de esgoto sanitário da ETE de Jundiaí. ....   | 36 |
| <b>Tabela 8</b> – Distribuição granulométrica dos tratamentos.....   | 37 |
| <b>Tabela 9</b> – Caracterização da granulometria dos diferentes tratamentos estudados.....  | 38 |
| <b>Tabela 10</b> – Variações químicas dos tratamentos (A), (B) e (C). ....   | 38 |
| <b>Tabela 11</b> – Concentrações de elementos químicos presentes em diferentes profundidades do solo de área degradada e área tratada com lodo de esgoto sanitário. .... | 41 |
| <b>Tabela 12</b> – Teores de nutrientes no solo antes e após a aplicação do lodo de esgoto sanitário. ....   | 43 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| <b>Quadro 1</b> – Impactos ambientais relacionados às diferentes alternativas de disposição de lodo de esgoto..... | 8  |
| <b>Quadro 2</b> – Itens a serem considerados na composição de custos de investimento.....                          | 15 |
| <b>Quadro 3</b> – Itens a serem considerados na composição de custos de operação.<br>.....                         | 16 |
| <b>Quadro 4</b> – Metodologia aplicada na elaboração do PRAD.....  | 23 |

## LISTA DE SIGLAS

**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas

**AIA** – Avaliação de Impacto Ambiental

**ART** – Anotação de Responsabilidade Técnica

**C** – Carbono

**Ca** – Cálcio

**CAESB** – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal

**CAPES** – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

**Cd** – Cádmiio

**Co** – Cobalto

**COMUSA** – Companhia Municipal de Saneamento

**CONAMA** – Conselho Nacional do Meio Ambiente

**COPASA** – Companhia de Saneamento de Minas Gerais

**Cr** – Cromo

**Cu** – Cobre

**EMBRAPA** – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

**ETE** – Estação de Tratamento de Esgoto

**FAV** – Faculdade de Agronomia e Veterinária

**Fe** – Ferro

**Hg** – Mercúrio

**IBAMA** – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

**IBRAM** – Instituto Brasileiro de Mineração

**K** – Potássio

**LE** – Lodo de Esgoto

X

**LP** – Licença Prévia

**Mg** – Magnésio

**Mn** – Manganês

**MO** – Matéria Orgânica

**Mo** – Molibdênio

**NBR** – Norma Brasileira

**Ni** – Níquel

**ONU** – Organização das Nações Unidas

**P** – Fósforo

**Pb** – Chumbo

**PNMA** – Política Nacional do Meio Ambiente

**PRAD** – Plano de Recuperação de Áreas Degradadas

**RALF** – Reator Anaeróbico de Leito Fluidizado

**RCC** – Resíduos da Construção Civil

**RM** – Rejeito de Mineração

**S** – Enxofre

**SBCS** – Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

**Sn** – Estanho

**UFMG** – Universidade Federal de Minas Gerais

**UFRGS** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**USEPA** – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

**Zn** – Zinco

## Sumário

|   |  |    |
|---|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO .....   | 1  |
| 2 | OBJETIVO GERAL .....   | 4  |
|   | 2.1 Objetivos Específicos .....  | 4  |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....   | 5  |
|   | 3.1 Lodo de esgoto sanitário .....   | 5  |
|   | 3.1.1 Biossólido.....  | 9  |
|   | 3.1.2 Legislação vigente sobre a aplicação do lodo de esgoto sanitário em solos        | 12 |
|   | 3.1.3 Aspectos econômicos da utilização do lodo de esgoto sanitário no solo            | 15 |
|   | 3.2 Áreas degradadas pela mineração .....  | 16 |
|   | 3.2.1 Recuperação ambiental .....  | 18 |
|   | 3.2.2 Legislação vigente sobre a recuperação de áreas degradadas .....                 | 21 |
|   | 3.2.3 Plano de Recuperação de Área Degradada – PRAD.....                               | 21 |
|   | 3.2.4 Revegetação ambiental .....  | 24 |
|   | 3.2.5 Utilização do lodo de esgoto sanitário para recuperação da fertilidade do solo   | 25 |
| 4 | METODOLOGIA .....  | 27 |
|   | 4.1 Caracterização do lodo de esgoto sanitário.....                                    | 28 |
|   | 4.2 Parâmetros físicos e químicos do solo após a aplicação do lodo de esgoto sanitário | 31 |
| 5 | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....   | 33 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 5.1 | Caracterização do lodo de esgoto sanitário.....   | 33 |
| 5.2 | Alterações nos parâmetros físicos e químicos do solo após a aplicação do lodo de esgoto sanitário ..... | 36 |
| 6   | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....  | 44 |
| 7   | CONCLUSÃO .....   | 46 |
|     | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 47 |

# 1 INTRODUÇÃO

A mineração torna-se cada vez mais essencial às nossas vidas, tendo em vista a sua contribuição tanto para a melhoria da qualidade de vida quanto para o desenvolvimento socioeconômico. Sendo assim, as atividades minerárias irão perdurar ao longo de muitos anos, cabendo a nós, a implementação de técnicas que possam proporcionar o desenvolvimento mineral aliado à minimização dos impactos negativos causados ao meio ambiente.

A atividade de extração mineral, ao longo do seu desenvolvimento, é uma atividade que causa inúmeros impactos no meio físico e biótico dos ecossistemas. A princípio, as principais alterações físicas da paisagem estão relacionadas ao processo de abertura de cavas e a posterior disposição de material inerte, proveniente da remoção do solo superficial (IBRAM, 2016), visto que no Brasil, há uma maior predominância de minas a céu aberto (CURI, 2017). A depender do tipo de minério a ser explorado e das formas de tratamento o qual ele sofrerá, a intensidade desses impactos no meio ambiente tende a variar, e, por consequência, as técnicas de minimização desses impactos exigirão aprimoramentos (CURI, 2017) considerando-se que quanto maior é o grau de degradação de uma área, menor é a sua velocidade de regeneração (OLIVEIRA, 2015).

A ação e obrigação de recuperar uma área degradada foi instituída através da Lei nº 6.938, de 31/08/1981, a qual dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e, a partir do ano de 1986, através da Resolução nº 1 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), foram estabelecidos os critérios básicos e as diretrizes gerais para a avaliação dos impactos ambientais como instrumento da PNMA (BRASIL, 1981; CONAMA, 1986).

As áreas degradadas devem, por lei, sofrer o processo de recuperação ambiental, porém a eficácia dessa ação irá depender da melhoria ocasionada na qualidade do solo, a qual pode ser alcançada, dentre outros métodos, através da inserção de matéria orgânica a partir do rompimento de camadas compactadas (OLIVEIRA, 2015).



A viabilidade desse método pode proporcionar melhorias nos aspectos químicos, físicos e biológicos desse ecossistema, tornando-o posteriormente mais propenso à revegetação (AMARAL, 2017), porém, além de estar relacionada à capacidade de restabelecimento do solo, a recuperação de áreas degradadas é um processo demorado e multidisciplinar que engloba diferentes esferas de conhecimento (SANTOS, 2017).

A procura por uma destinação final mais sustentável para compostos orgânicos tornou o lodo de esgoto sanitário (lodo gerado a partir do tratamento de esgoto) uma fonte alternativa para a recuperação de áreas degradadas (OLIVEIRA, 2015) visto que ele é um subproduto muito rico em matéria orgânica, como proteínas, carboidratos e gorduras (KRIGUEL *et al.*, 2015) favorecendo então a recuperação e o processo de revegetação.

O uso do lodo de esgoto sanitário na recuperação de áreas degradadas torna-se uma solução viável ambientalmente e também de âmbito social e de saúde visto que atualmente ele é descartado em aterros sanitários. Adicionalmente, existe uma certa preocupação relacionada ao impacto desse resíduo no meio ambiente e também à transmissão de doenças devido a presença de patógenos e de eventuais metais pesados em sua composição (OLIVEIRA, 2015).

O lodo de esgoto sanitário, quando incorporado ao solo, possui como vantagens o aumento da quantidade de matéria orgânica e o fornecimento de nutrientes ao solo, como por exemplo o Fósforo, Nitrogênio, Potássio, Carbono e o Magnésio. Além disso, o lodo de esgoto sanitário contribui com o aumento da porosidade do solo, melhorando a sua capacidade de retenção de água (MOTA, 2022).

Uma outra vantagem relacionada à incorporação do lodo de esgoto sanitário ao solo é a melhoria no crescimento e rendimento de culturas (MOTA, 2022).

Em contrapartida, o lodo de esgoto sanitário pode possuir algumas desvantagens, como por exemplo a presença de alguns possíveis patógenos, poluentes e metais pesados, os quais podem afetar o solo, a biodiversidade e a saúde pública, sendo então necessárias análises químicas de suas características antes da sua incorporação ao solo (MOTA, 2022).

Alguns exemplos de desvantagens da aplicação do lodo de esgoto sanitário em solos são: o acúmulo de elementos tóxicos, como metais pesados, poluentes

orgânicos e agentes patogênicos no solo; lixiviação de compostos provenientes da sua decomposição no solo, como por exemplo o chorume; contaminação de áreas adjacentes e corpos hídricos caso ocorra escoamento superficial do material e volatilização de compostos, os quais podem trazer maus odores e contribuir para a atração de vetores (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

Afim de minimizar esses possíveis impactos negativos, o lodo de esgoto sanitário é submetido a um tratamento de higienização, estabilização e secagem, e então, passa a ser considerado como um bio sólido (CONAMA, 2020) e com isso, seus nutrientes podem ser devolvidos ao solo como forma de adubo, visto que a aplicação do bio sólido pode melhorar as suas características físicas e químicas (ARTICO, 2018).

O termo “bio sólido”, para Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), é uma forma de ressaltar os aspectos benéficos do lodo de esgoto sanitário, dando valor à sua utilização, em termos produtivos, quando comparada à disposição final em aterros sanitários, por exemplo, onde não há nenhum processo produtivo envolvido.

Conforme citado acima, a utilização do lodo de esgoto sanitário como fonte alternativa para a recomposição de solos degradados se revelou como uma técnica muito promissora de disposição final desse resíduo (OLIVEIRA, 2015), pois a expansão do saneamento no Brasil acarreta na geração de quantidades significativas desse resíduo (BITTENCOURT, 2014), o qual, em sua maioria, é descartado em aterros sanitários.

Sendo assim, visto que atualmente a disposição final do lodo de esgoto sanitário é realizada, em sua maioria, em aterros sanitários e, em face ao supracitado, o presente trabalho propõe, através de uma revisão bibliográfica, analisar a aplicabilidade desse resíduo em áreas degradadas pela mineração e, também, contribuir com os futuros trabalhos acerca deste tema.

## **2 OBJETIVO GERAL**

O objetivo do presente trabalho é realizar um levantamento bibliográfico a partir de estudos da aplicabilidade e utilização de um derivado rico em nutrientes do tratamento de esgoto sanitário no auxílio à recuperação de áreas degradadas pela mineração.

### **2.1 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos, os quais são fundamentais para a realização e desenvolvimento do trabalho proposto são:

1. Analisar as orientações vigentes da legislação quanto ao uso e aplicação do lodo de esgoto sanitário para a recuperação do solo;
2. Caracterizar o perfil físico e químico do lodo de esgoto sanitário urbano;
3. Avaliar os parâmetros químicos e físicos do solo após a aplicação do lodo de esgoto sanitário.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo serão abordados os termos relacionados às características e aplicações do lodo de esgoto sanitário, bem como a legislação aplicada a ele, além da contextualização acerca do processo inerente à recuperação de áreas degradadas pela mineração.

#### 3.1 Lodo de esgoto sanitário

O lodo de esgoto sanitário pode ser considerado como um subproduto proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) que caso não sejam encontradas alternativas para a sua utilização pode ser considerado como uma ameaça ao meio ambiente (OLIVEIRA, 2015). O lodo de esgoto sanitário é um produto rico em matéria orgânica, porém possui uma grande concentração de microrganismos patogênicos, os quais podem ser prejudiciais à saúde pública, sendo assim, ele necessita de um tratamento ambientalmente viável, correto e eficaz (KRIGUEL *et al.*, 2015). O lodo de esgoto sanitário é basicamente uma mistura de água (em maior quantidade) e sólidos, que se dividem entre orgânicos (proteínas, carboidratos e gorduras) em sua maior parte, e inorgânicos (areia, sais e metais).

De uma forma geral, os subprodutos sólidos gerados no tratamento de esgoto são: material gradeado/sólidos grosseiros, areia, espuma, lodo primário, lodo secundário e lodo químico (caso exista etapa físico-química). A princípio, em todos os processos de tratamento biológico ocorre a geração de lodo. Os decantadores primários geram o lodo primário, o qual é composto pelos sólidos do esgoto bruto que sofrem sedimentação. Na etapa biológica, é gerado o lodo secundário, o qual é a própria biomassa que cresceu através do esgoto afluyente. Essa biomassa deve ser removida, pois ela tende a se acumular no sistema, ocasionando na sua saída junto com o efluente final. A depender do sistema, o lodo primário pode ser tratado junto com o lodo secundário, formando uma espécie de lodo misto. Já em sistemas que

possuem a etapa físico-química, tem-se o lodo químico (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

Em todos os casos citados acima, o descarte do lodo é necessário, separando-o da parte líquida. Entretanto, nem todos os sistemas necessitam de descarte contínuo, alguns sistemas conseguem armazenar o lodo em lagoas facultativas, por exemplo, já outros permitem um descarte para os reatores anaeróbios e por fim, outros necessitam de um descarte contínuo, como é o caso dos lodos ativados (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

O lodo gerado no tratamento de esgoto passa também pelos processos de secagem (Figura 1), estabilização (eliminação de odores), higienização e disposição final. O lodo deve ser condicionado para que haja a redução de água. Caso a sua destinação final seja a aplicação na agricultura, o lodo de esgoto sanitário passa pelo processo de higienização, o qual tem por objetivo a remoção de patógenos (OLIVEIRA, 2015).

**Figura 1** – Lodo de ETE acondicionado no leito de secagem.



Fonte: AUTOR (2022).

Quando tratado, o efluente (quando utilizado como biofertilizante) possui, além do valor econômico, benefícios ambientais, visto que o seu reuso remove o teor de nutrientes, como o nitrogênio e o fósforo do efluente, o que faz com que quando lançado nos corpos d'água, ele não contribua com a eutrofização dos mananciais (POLAT; DEMIR; ERLER, 2010).

A disposição final do lodo de esgoto sanitário é considerada como uma das etapas mais problemáticas do ciclo do tratamento de esgoto sanitário, visto que o seu descarte inadequado traz sérios problemas ambientais como a contaminação do lençol freático, da água e do solo, além de problemas de saúde pública (MARTINS *et al.*, 2022), conforme evidenciado no Quadro 1.

**Quadro 1** – Impactos ambientais relacionados às diferentes alternativas de disposição de lodo de esgoto.

| Alternativa de disposição de lodo de esgoto         | Potenciais impactos ambientais negativos  |
|---|---|
| Incineração   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Poluição do ar;</li> <li>• Impactos associados ao local de disposição das cinzas.</li> </ul>   |
| Aterro sanitário                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Poluição de águas superficiais e subterrâneas;</li> <li>• Poluição do ar;</li> <li>• Poluição do solo;</li> <li>• Transmissão de doenças;</li> <li>• Impactos estéticos e sociais.</li> </ul>              |
| <i>Landfarming</i> (disposição superficial no solo) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Poluição de águas superficiais e subterrâneas;</li> <li>• Poluição do ar;</li> <li>• Poluição do solo;</li> <li>• Transmissão de doenças.</li> </ul>   |
| Recuperação de áreas degradadas                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Poluição de águas superficiais e subterrâneas;</li> <li>• Poluição do solo;</li> <li>• Odor;</li> <li>• Contaminação de elementos da cadeia alimentar;</li> <li>• Transmissão de doenças.</li> </ul>       |
| Reciclagem agrícola                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Poluição de águas superficiais e subterrâneas;</li> <li>• Poluição do solo;</li> <li>• Odor;</li> <li>• Contaminação de elementos da cadeia alimentar;</li> <li>• Impactos estéticos e sociais.</li> </ul> |

Fonte: Adaptado de ANDREOLI, VON SPERLING e FERNANDES (2001).

Atualmente, a disposição final do lodo de esgoto sanitário acontece, em sua maioria, em aterros sanitários. A problemática se dá acerca da sua disposição inadequada, visto que além de microrganismos patogênicos, o lodo de esgoto sanitário pode apresentar em sua composição metais pesados como: Cádmiio, Cromo, Cobre, Níquel, Chumbo, Ferro, Cobalto, Manganês, Molibdênio, Mercúrio, Estanho e Zinco (AMARAL, 2017), os quais podem trazer problemas à saúde pública e ao meio ambiente.

### **3.1.1 Biossólido**

Nos Estados Unidos, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) considera “biossólido” como um produto sólido e orgânico que é gerado através do processo de tratamento de esgoto dos municípios e, quando proveniente de sistema de tratamento biológico dos despejos sanitários e apresentar características que o permitem ser utilizado com segurança na agricultura (USEPA, 1995).

Para Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), o termo “biossólido” é uma maneira de ressaltar os aspectos benéficos do lodo de esgoto sanitário, dando valor à sua utilização produtiva quando comparada à sua disposição final em aterros, disposição superficial no solo ou até mesmo incineração, processos os quais são totalmente improdutivos.

No Brasil, o termo “biossólido” foi criado a partir da Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020, o qual significa “produto do tratamento do lodo de esgoto sanitário que atende aos critérios microbiológicos e químicos estabelecidos nesta Resolução, estando, dessa forma, apto a ser aplicado em solos”, ou seja, o lodo de esgoto sanitário só pode ser considerado como um biossólido após sofrer beneficiamento, que é um conjunto de processos de tratamento aplicados a ele (CONAMA, 2020).



Segundo Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001) as principais etapas do tratamento do lodo de esgoto sanitário são: Adensamento, Estabilização, Condicionamento, Desaguamento, Higienização e Disposição final.

O adensamento é a etapa que possui como objetivo a diminuição do volume do lodo de esgoto sanitário através do aumento da sua concentração de sólidos e a diminuição da sua concentração de água (PEDROZA *et al.*, 2010).

O processo de estabilização do lodo tem por objetivo a remoção de matéria orgânica (redução de sólidos voláteis). Essa etapa é considerada como muito importante para a reciclagem agrícola. Além disso, a estabilização do lodo, que pode ser realizada tanto através da digestão aeróbica, quanto da digestão anaeróbica, promove a redução da quantidade de patógenos e a eliminação de maus odores (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001; PEDROZA *et al.*, 2010).

O condicionamento é um processo que visa melhorar a sua “captura” de sólidos nos sistemas de desidratação do lodo, por meio da adição de coagulantes (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

O desaguamento do lodo possui como objetivo a remoção de água de forma a reduzir ainda mais o seu volume, produzindo um lodo praticamente sólido. Tal etapa pode ser realizada por métodos naturais ou mecânicos (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

O processo de higienização do lodo é uma operação extremamente necessária caso o seu destino seja a reciclagem agrícola, ou seja, a higienização é o processo que torna o lodo de esgoto sanitário viável para ser utilizado como biossólido, reduzindo ainda mais a quantidade de patógenos, através, por exemplo, dos métodos de tratamento químico alcalino, compostagem e secagem térmica (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

Para Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), de uma maneira geral, o processo de higienização do lodo de esgoto sanitário busca garantir um nível de patogenicidade, o qual não venha causar riscos à saúde pública, aceitável quando o lodo de esgoto sanitário é disposto no solo.

A compostagem é um processo de decomposição de matéria orgânica que acontece em condições controladas de oxigênio, temperatura, umidade e também nutrientes. A inativação dos microrganismos presentes no lodo ocorre através do

aumento da temperatura na etapa onde há maior atividade do processo. Para ocorrer a retenção de umidade, aumento da porosidade e equilíbrio da relação carbono/nitrogênio, alguns materiais como cavacos de madeira, serragem e folhas podem ser adicionados ao lodo (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

Para Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), ocorrem três etapas durante a compostagem, sendo elas:

1. Fase Inicial Mesófila: etapa de maior crescimento de microrganismos mesófilos e aumento da temperatura;
2. Fase Termófila: quando a temperatura aumenta, os microrganismos mesófilos diminuem, com isso, começam a surgir bactérias e fungos, elevando a temperatura devido a atividade reprodutora e, por consequência, inativam microrganismos patogênicos;
3. Fase Final Mesófila: o substrato orgânico se esgota e a temperatura diminui, reduzindo a população de bactérias termófilas e aumentando a população de bactérias mesófilas.

A caleação ou estabilização alcalina é usada no tratamento de lodos primários, secundários ou digeridos, líquidos ou sólidos. O processo ocorre através da adição de cal virgem ( $\text{CaO}$ ) em lodos na fase sólida ou cal hidratada ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) em lodos na fase líquida para que o seu pH aumente para 12, reduzindo a população de microrganismos (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

Por fim, a secagem térmica consiste em provocar a evaporação da umidade do lodo e a inativação térmica dos microrganismos por meio do aumento da temperatura provocado por uma fonte de calor. Cabe ressaltar que para que esse processo seja economicamente viável, o lodo de esgoto sanitário precisa estar previamente desidratado, possuindo um teor de sólidos entre 20 e 35%. O processo de secagem térmica do lodo ocorre por meio de dois sistemas: os secadores de contato direto, sistema no qual o ar quente fica em contato direto com o lodo e os secadores de contato indireto, onde o calor é proveniente de placas de troca térmica (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

### **3.1.2 Legislação vigente sobre a aplicação do lodo de esgoto sanitário em solos**

Nos Estados Unidos, a quantidade de contaminantes permitida no lodo de esgoto sanitário é regulamentada pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), mais especificamente pela Lei de Água Limpa (*Clean Water Act*), que entrou em vigor em 1993 (ARTICO, 2018).

Sendo assim, tomando como base o regulamento norte americano citado acima, foi criada no Brasil a Resolução CONAMA nº 375, de 29 de agosto de 2006, a qual “define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências” (CONAMA, 2006).

Na Resolução CONAMA nº 375/2006 não foi adotado o termo “biossólido”, sendo utilizado o termo “lodo de esgoto” para todo tipo de lodo, mesmo após ser processado para que haja o seu uso seguro (BITTENCOURT, 2014).

A Resolução CONAMA nº 498 de 19 de agosto de 2020, a qual “define critérios e procedimentos para a produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências” (CONAMA, 2020) revoga a Resolução de nº 375/2006. Nela, tem-se a definição de biossólido, o qual pode ser considerado como um produto derivado do tratamento do lodo de esgoto sanitário que atende aos critérios tanto microbiológicos, quanto químicos estabelecidos na Resolução em questão, sendo assim, apto a ser aplicado em solos (CONAMA, 2020).

Em seu Art. 10, a Resolução nº 498 classifica o biossólido em Classe 1 ou Classe 2, conforme os valores máximos permitidos de substâncias químicas (Tabela 1), sendo que esses valores não podem ser ultrapassados (CONAMA, 2020).

**Tabela 1** – Valores máximos permitidos de substâncias químicas no bioossólido a ser destinado para uso, em solos.

| Substâncias químicas | Valor máximo permitido no bioossólido (mg/kg ST) |          |
|----------------------|--|----------|
|                      | Classe 1   | Classe 2 |
| Arsênio              | 41   | 75       |
| Bário                | 1300   | 1300     |
| Cádmio               | 39   | 85       |
| Chumbo               | 300  | 840      |
| Cobre                | 1500   | 4300     |
| Cromo                | 1000   | 3000     |
| Mercúrio             | 17   | 57       |
| Molibdênio           | 50   | 75       |
| Níquel               | 420  | 420      |
| Selênio              | 36   | 100      |
| Zinco                | 2800   | 7500     |

Fonte: CONAMA (2020).

Cabe ressaltar ainda que o bioossólido que se enquadra na categoria Classe 2, somente poderá ser aplicado em solos se “a taxa máxima anual e a carga máxima acumulada de substâncias químicas não exceder os limites apresentados na tabela abaixo” (CONAMA, 2020):

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

| Substâncias químicas | Taxa máxima anual (kg.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> ) | Carga máxima acumulada (kg/ha) |                               |
|----------------------|---|--------------------------------|-------------------------------|
|                      |   | 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: CONAMA (2020).

Por fim, é importante frisar que tanto as características químicas do lodo de esgoto sanitário, quanto a sua composição variam em função do seu local de origem (área predominantemente residencial ou industrial) e da época do ano, além de outros fatores (OLIVEIRA, 2015).

### 3.1.3 Aspectos econômicos da utilização do lodo de esgoto sanitário no solo

No que diz respeito aos custos, este é um fator de suma importância. Eles devem ser divididos, principalmente, em custos de processamento do lodo, transporte e disposição final, levando em consideração tanto os custos de investimento, quanto os custos operacionais (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

Os quadros 2 e 3 apresentam itens a serem considerados na composição de custos de investimento e de operação, respectivamente.

**Quadro 2** – Itens a serem considerados na composição de custos de investimento.

| Item                  | Comentários/Sugestões  |
|-----------------------|--|
| Áreas necessárias     | Áreas necessárias às construções, instalações de equipamentos e pátios de estocagem.   |
| Equipamentos          | Incluir preço de todos os equipamentos a serem utilizados. Incluir preço dos equipamentos de adensamento e desidratação do lodo, visto que podem variar a depender dos requisitos de destinação do lodo. |
| Material de manuseio  | Tratores e caminhões necessários à movimentação do lodo na ETE.  |
| Obras civis           | Fundações para instalações de equipamentos, galpões, áreas concretadas ou asfaltadas.  |
| Instalações elétricas | A depender dos tipos de tratamento do lodo.  |
| Diversos              | Gastos imprevistos. Para obras civis, valores em torno de 10% do total. Para equipamentos eletromecânicos, valores em torno de 20% do total.   |

Fonte: Adaptado de ANDREOLI, VON SPERLING e FERNANDES (2001).

**Quadro 3** – Itens a serem considerados na composição de custos de operação.

| Item                       | Comentários/Sugestões  |
|----------------------------|--|
| Obras civis                | Considerar amortização em 20 anos, ou seja, um custo anual de 5% do montante investido.  |
| Equipamentos               | Considerar amortização de 7 anos para alguns casos;<br>Vida útil de 20 anos para alguns equipamentos;<br>Equipamentos, como por exemplo, caçambas e bombas possuem vida útil de 5 anos e custo anual de 20% do investimento inicial. |
| Manutenção de equipamentos | Em média, 5% ao ano do custo de aquisição.   |
| Energia                    | A depender da fonte energia utilizada.   |
| Matérias primas            | Todos os produtos químicos utilizados para a desidratação e tratamento do lodo, como coagulantes e cal.  |
| Transporte e manuseio      | Seu custo possui alto impacto e depende da concentração de sólidos do lodo.  |
| Mão de obra                | Quantidade de empregados.  |
| Gestão e controle          | Análises físico-químicas e microbiológicas, equipamentos de escritório e custos de administração. Valor aproximado de 6 a 9% dos custos de operação.   |

Fonte: Adaptado de ANDREOLI, VON SPERLING e FERNANDES (2001).

### 3.2 Áreas degradadas pela mineração

O Brasil é um país que possui um território de extensão continental e com uma vasta diversidade geológica que propicia a existência de inúmeras jazidas dos mais

variados minerais. Sendo assim, o Brasil alcançou uma posição de grande destaque no cenário mundial no que diz respeito ao número de reservas e de produção mineral, a qual atingiu entre 2014 e 2015 uma média anual de US\$ 33 bilhões (IBRAM, 2016).

A predominância de lavras a céu aberto no Brasil é maior devido, principalmente, à extração de minérios metálicos, como por exemplo o minério de ferro (CURI, 2017). Decorrentes das atividades de mineração, as principais alterações físicas da paisagem são inicialmente encontradas durante a abertura de cavas e a posterior disposição de material inerte, proveniente da remoção do solo superficial (IBRAM, 2016).

Entende-se por área degradada um ecossistema no qual ocorreu processo de alteração, ocasionando a destruição da sua vegetação nativa e de seus métodos de regeneração biótica, bem como a perda da camada fértil do solo; remoção/expulsão da fauna local; características de vazão de seus recursos hídricos alterados, podendo levar à escassez dos mesmos. Sendo assim, a degradação ambiental acontece quando já não existem mais maneiras de adaptação às características físicas, químicas e biológicas, sendo, portanto, inviável também o desenvolvimento econômico e social sem que haja uma posterior intervenção humana para que o ecossistema retorne, o mais próximo possível, ao seu estado anterior por meio da readaptação de tais características (IBAMA, 1990).

Área degradada pode ser considerada como aquela área que sofreu manejo de maneira incorreta, culminando na diminuição da sua produtividade devido ao dano a que a mesma foi submetida após sofrer, por exemplo, a remoção do seu solo de cobertura, impedindo a sua recuperação natural, a qual só poderá ser efetivada após intervenção antrópica (AMARAL, 2017).

A atividade minerária possui grau de impacto ambiental de alta magnitude devido às modificações físicas e bióticas que são provocadas tanto nas áreas de influência direta e indireta do projeto do empreendimento, ocorrendo desde a fase de pesquisa mineral até a etapa de fechamento de mina. Na prática de mineração a céu aberto, a vegetação e a camada de solo superficial são removidas, ocasionando enormes alterações no perfil do solo original (ARTICO, 2018). Os principais impactos causados



à paisagem são provenientes da abertura das cavas, da disposição de material estéril advindo da remoção superficial do solo e da disposição de rejeitos dos processos de beneficiamento (IBRAM, 2016).

### **3.2.1 Recuperação ambiental**

Recuperação ambiental, segundo o Manual de Recuperação de Áreas Degradadas pela Mineração: Técnicas de Revegetação (IBAMA, 1990), significa que “o sítio degradado será retornado a uma forma e utilização de acordo com um plano preestabelecido para o uso do solo. Implica que uma condição estável será obtida em conformidade com os valores ambientais, estéticos e sociais da circunvizinhança”. Sendo assim, o sítio degradado poderá ter as condições mínimas de se estabelecer um novo equilíbrio dinâmico através do desenvolvimento de um novo solo e, por consequência, de uma nova paisagem.

Na Instrução Normativa IBAMA nº 04, de 13 de abril de 2011, conceitua-se o termo recuperação como a “restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada a uma condição não degradada, que pode ser diferente de sua condição original, conforme art. 2º, inciso XIII, da Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000” (IBAMA, 2011; BRASIL, 2000).

Segundo a definição de recuperação dada pela ABNT NBR 13030/99, pode-se dizer que recuperação é o conjunto de procedimentos utilizados para realizar a recomposição de uma área degradada para se estabelecer a função original do ecossistema (ABNT, 1999).

Por fim, citando outro autor, a recuperação de áreas degradadas pela mineração pode ser entendida também como um conjunto de ações que tem por finalidade tornar a área em questão propícia para uso produtivo, não sendo necessário o mesmo uso antecedente à atividade minerária (SANCHEZ, 2001).

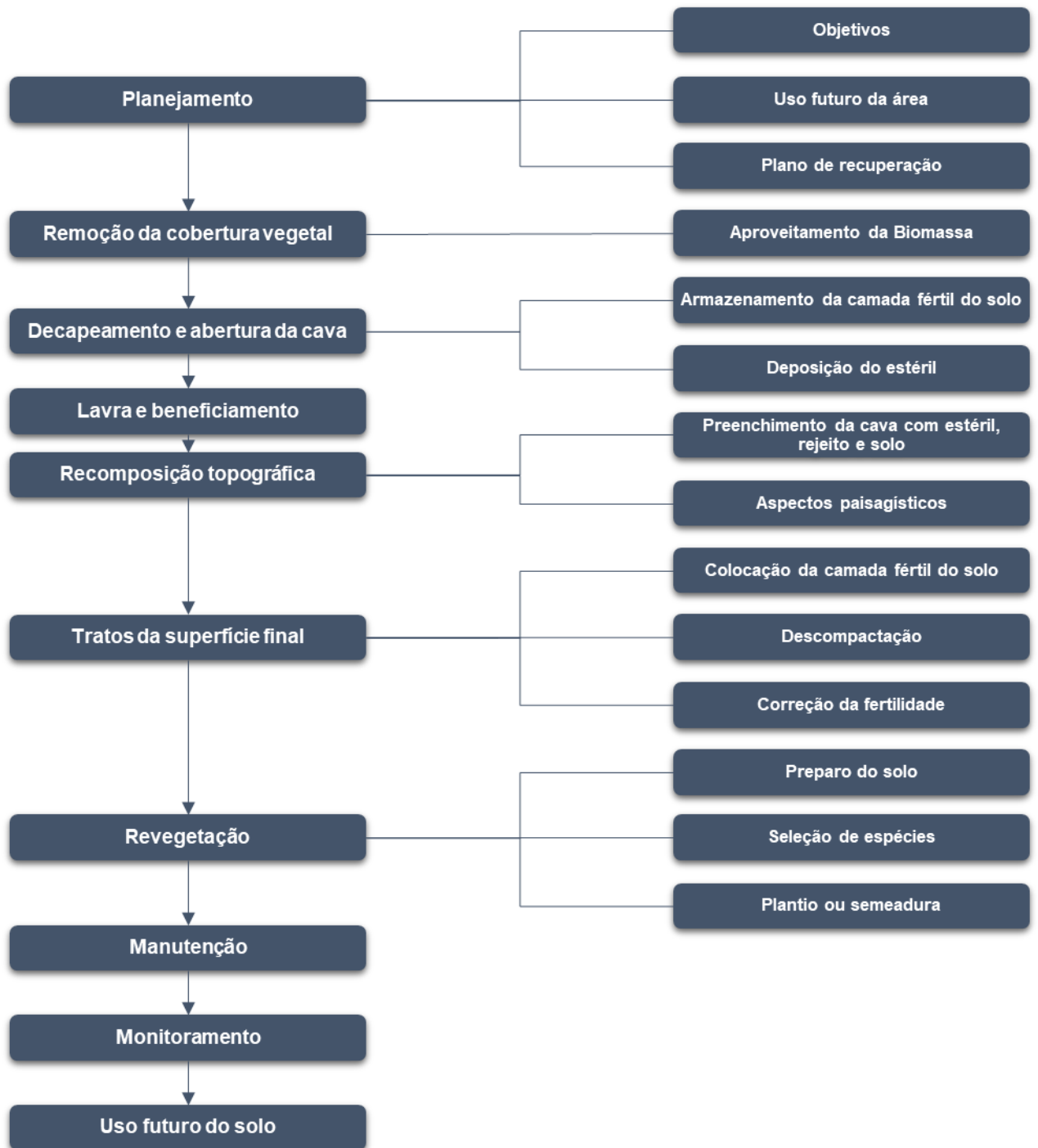
Após o entendimento do conceito de recuperação, pode-se concluir que a recuperação de áreas degradadas pela mineração tem como objetivo principal estabelecer uma nova maneira de se utilizar essa área minerada, baseando-se em um plano já preestabelecido de uso do solo, por exemplo (LEMOS, 2016).

Além do termo recuperação, existem outros dois termos comumente utilizados, como por exemplo a reabilitação e a restauração. Essa, segundo o Manual de Recuperação de Áreas Degradadas, pode ser definida como “o retorno ao estado original, antes da degradação” (IBAMA, 1990) e, segundo a ABNT NBR 13030/99, pode ser definida como o “conjunto de procedimentos através dos quais é feita a reposição das exatas condições ecológicas da área degradada pela mineração, de acordo com o planejamento estabelecido” (ABNT, 1999). Já a reabilitação, pode ser entendida como o “conjunto de procedimentos através dos quais se propicia o retorno da função produtiva da área ou dos processos naturais, visando adequação ao uso futuro” (ABNT, 1999), sendo essa definição a mais próxima da realidade pois engloba o uso e ocupação do solo e uma relativa produtividade (LEMOS, 2016).

Como as áreas degradadas sofrem o processo de revegetação, tanto o termo recuperação, quanto reabilitação são aceitos atualmente (IBAMA, 1990). O termo restauração é um tanto quanto improvável, visto que são enormes os volumes de materiais removidos durante a atividade minerária (LEMOS, 2016).

O fluxograma abaixo (Figura 2) ilustra de forma resumida as etapas, em ordem cronológica, que compõem o processo de recuperação ambiental:

**Figura 2** – Fluxograma de execução da recuperação ambiental.



Fonte: Adaptado de IBAMA (1990).

### **3.2.2 Legislação vigente sobre a recuperação de áreas degradadas**

A Lei nº 6.938/81, a qual instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente, foi a primeira a incluir em seu escopo a necessidade de se recuperar uma área degradada (BRASIL, 1981). Já o Decreto nº 97.632, ao regulamentar o artigo 2º, inciso VIII da Lei nº 6.938/81 trata especificamente da recuperação de áreas degradadas pela mineração (BRASIL, 1981).

A Instrução Normativa IBAMA nº 04 de 2011, em seu art. 1º, estabelece os procedimentos para a elaboração do Plano de Recuperação de Área Degradada, o PRAD, para que seja cumprida a legislação ambiental e os Termos de Referência desta Instrução Normativa, os quais estabelecem as orientações técnicas para a apresentação do PRAD (IBAMA, 2011).

Visto que a obrigação da recuperação de uma área degradada se estende a todos os empreendimentos minerários, a ABNT NBR 13030/99 aponta parâmetros técnicos acerca deste assunto. Seu objetivo é fixar “diretrizes para elaboração e apresentação de projeto de reabilitação de áreas degradadas pelas atividades de mineração, visando a obtenção de subsídios técnicos que possibilitem a manutenção e/ou melhoria da qualidade ambiental, independente da fase de instalação do projeto” (ABNT, 1999).

Como a ABNT não possui competência jurídica, ao determinar os requisitos para elaboração do PRAD, através da NBR 13030/99, cabe ressaltar que tais requisitos são recomendações de caráter instrutivo, apesar de contemplar medidas de controle ambiental desde as fases de planejamento, implantação e lavra até o fechamento de mina (LEMOS, 2016).

### **3.2.3 Plano de Recuperação de Área Degradada – PRAD**

Um empreendimento minerário pode causar inúmeras alterações ambientais, como por exemplo, alterações de cunho visual, supressão de vegetação, mudanças

na topografia do local, aceleração dos processos de erosão, assoreamento dos corpos d'água, além de distúrbios na qualidade do ar através da emissão de particulados e de ruídos (LEMOS, 2016).

Para que haja uma exploração minerária no Brasil, a mesma necessita de uma aprovação prévia por parte do órgão ambiental governamental que, para minimizar ou eliminar os efeitos no meio ambiente, faz uso de um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), o qual é um estudo solicitado pelo próprio órgão ambiental durante a etapa do licenciamento ambiental, devendo ser apresentado antes da emissão da Licença Prévia (LP) da lavra (LEMOS, 2016).

A elaboração do PRAD deve seguir as diretrizes impostas no Projeto Executivo da NBR 13030, da Associação Brasileira de Normas e Técnicas (ABNT) do ano de 1999, onde deve constar, dentre outros, a verificação ao cumprimento das exigências de proteção ao meio ambiente, o atendimento às exigências da qualidade ambiental da área após o seu processo de reabilitação, a eficácia no que diz respeito a manutenção dos resultados e desempenho da área reabilitada, além da inclusão de programas de monitoramento (ABNT, 1999).

Além das diretrizes impostas no Projeto Executivo da NBR 13030, a elaboração do PRAD também deve seguir o Termo de Referências da Instrução Normativa IBAMA nº 04 de 13 de abril de 2011, o qual possui como metodologia o inscrito no Quadro 4 (IBAMA, 2011):

**Quadro 4** – Metodologia aplicada na elaboração do PRAD.

| Requisitos   | Componentes   |
|--|---|
| 1 Caracterização do Imóvel Rural<br>2 Identificação do Interessado<br>3 Identificação do Responsável Técnico pela Elaboração do PRAD<br>4 Identificação do Responsável Técnico pela Execução do PRAD | Anotação de Responsabilidade Técnica (ART)  |
| 5 Origem da Degradação<br>6 Caracterização Regional e Local<br>7 Caracterização da Área a Ser Recuperada<br>8 Objetivo Geral<br>9 Objetivos Específicos  | Mapas/Croquis/Planta  |
| 10 Implantação<br>11 Manutenção (Tratos Culturais e demais intervenções)<br>12 Monitoramento da Recuperação<br>13 Cronograma Físico e Cronograma Financeiro  | a. Reconformação topográfica<br>b. Construção das estruturas de drenagem<br>c. Revegetação das áreas<br>d. Plantio de enriquecimento em algumas áreas pela reintrodução de espécies nativas<br>e. Replântio<br>f. Adubação de cobertura<br>g. Coroamento<br>h. Controle de formigas cortadeiras<br>i. Monitoramento e avaliação |

Fonte: Adaptado de IBAMA (2011).

### 3.2.4 Revegetação ambiental

No geral, a recuperação de áreas degradadas possui três etapas, sendo elas: (1) reconformação da topografia, (2) reestabelecimento de uma camada fértil de solo e, por fim, (3) o replantio (ARTICO, 2018).

Os processos de remoção, estocagem e utilização da camada orgânica do solo de cobertura tem por objetivo auxiliar na fase de revegetação, como por exemplo na cobertura de áreas que foram lavradas ou até mesmo em pilhas de rejeito/estéril, locais os quais servirão de base para a instalação da cobertura vegetal (ARTICO, 2018).

A revegetação é considerada como “a prática principal para se obter a formação de um novo solo, controlar a erosão e evitar a poluição das águas” (IBAMA, 1990) e, além disso, se caso o uso futuro da área estiver relacionado à manutenção de vida selvagem, o processo de revegetação pode promover o retorno dessa vida.

A revegetação pode ser considerada como uma importante estratégia de mitigação dos impactos causados por uma atividade minerária (VASQUEZ, 2015).

O sucesso da revegetação de uma área degradada está estritamente relacionado às espécies vegetais utilizadas nesse processo. A formação de coberturas vegetais, as quais diminuem a temperatura do solo, retêm maiores quantidades de água, diminuem o escoamento superficial e previnem processos erosivos, se baseia em espécies de crescimento rápido e que possuem um grau de adaptação satisfatório (NOGUEIRA *et al.*, 2012).

“A escolha de espécies nativas regionais é importante, porque tais espécies já estão adaptadas às condições ecológicas locais” (MARTINS, 2021, p. 63).

Para a recuperação de solos degradados, como por exemplo os taludes, onde a camada fértil superficial rica em matéria orgânica foi removida, a técnica de plantio de leguminosas (herbáceas, arbustivas ou arbóreas de pequeno porte) que possuem a capacidade de formar simbiose com *Rhizobium* (gênero de bactérias que vivem no solo, capazes de fixar nitrogênio) é uma escolha adequada (MARTINS, 2021).

Segundo Martins (2021), leguminosas e gramíneas podem ser semeadas juntamente para se obter rápida cobertura do solo.

Sobre a combinação de leguminosas e gramíneas pode-se afirmar que:

A mistura de sementes de leguminosas com gramíneas na revegetação de taludes é interessante, dadas as peculiaridades de cada um desses grupos de plantas que acabam se completando. As leguminosas são fonte de material orgânico de fácil e rápida decomposição microbiana por terem baixa relação C/N, promovendo rápida liberação de substâncias estabilizadoras que atuam na estabilização dos agregados do solo. Já as gramíneas, por fornecerem resíduos mais permanentes devido à decomposição mais lenta, possuem alta capacidade de melhorar a estabilidade dos agregados do solo com efeito mais duradouro, além de terem sistema radicular extenso e concentrado na superfície, promovendo maior cobertura e proteção do talude. Contudo, deve-se sempre lembrar que muitas gramíneas, principalmente a braquiária e o capim-gordura, são inibidoras da sucessão e devem ser evitadas se o efeito de restauração da diversidade for um dos objetivos do projeto (MARTINS, 2021, p. 171).

Em Porto Trombetas, distrito de Oriximiná, no Pará, Campello (1998, apud MARTINS, 2021, p.171) verificou um desempenho maior das leguminosas *Acacia mangium* (Acácia) e *Sclerolobium paniculatum* (Taxi-branco) quando comparado com *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus citriodora* e *Goupia glabra* (Copiúba) em termos de biomassa da parte aérea e número de espécies nativas que foram regeneradas naturalmente em área de mineração.

Resultados como o apresentado acima mostram a eficiência da utilização de leguminosas na incorporação de matéria orgânica e na melhoria da fertilidade de solos degradados com o objetivo de facilitar a regeneração de espécies nativas consideradas mais exigentes (MARTINS, 2021).

### **3.2.5 Utilização do lodo de esgoto sanitário para recuperação da fertilidade do solo**

Conforme visto anteriormente, uma área degradada se caracteriza pelo não fornecimento de condições do desenvolvimento e da fixação da vegetação por conta da falta de matéria orgânica, nutrientes e atividade biológica, sendo assim, a incorporação do lodo de esgoto sanitário ao solo dessas áreas apresenta inúmeras



vantagens que podem favorecer a sua recuperação devido ao processo de revegetação (AMARAL, 2017; OLIVEIRA, 2015).

Os macros e micronutrientes que estão contidos nesse biossólido possuem papel fundamental na manutenção da fertilidade do solo, além de provocar impacto direto no desenvolvimento das plantas. A sua elevada quantidade de matéria orgânica aumenta os húmus no solo, o qual melhora a sua capacidade de armazenamento e de infiltração de água, reduzindo a erosão e contribuindo para a penetração das raízes e para o aumento da vida microbiana. Além disso, a matéria orgânica atua como condicionador do solo, melhorando suas características físicas, químicas e biológicas, favorecendo o desenvolvimento das plantas (ARTICO, 2018).

O uso do lodo de esgoto sanitário no solo pode melhorar seus níveis de fertilidade através do conseqüente aumento de pH, diminuição da acidez potencial e aumento da disponibilidade e reserva de nutrientes como por exemplo o Ca, Mg e S (ARTICO, 2018).

Apesar das vantagens citadas acima, a disposição do lodo de esgoto sanitário no solo ocasionar em algumas desvantagens, como por exemplo o acúmulo de elementos tóxicos, como metais pesados, poluentes orgânicos e agentes patogênicos no solo; lixiviação de compostos provenientes da sua decomposição no solo, como por exemplo o chorume; contaminação de áreas adjacentes e corpos hídricos caso ocorra escoamento superficial do material e volatilização de compostos, os quais podem trazer maus odores e contribuir para a atração de vetores (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

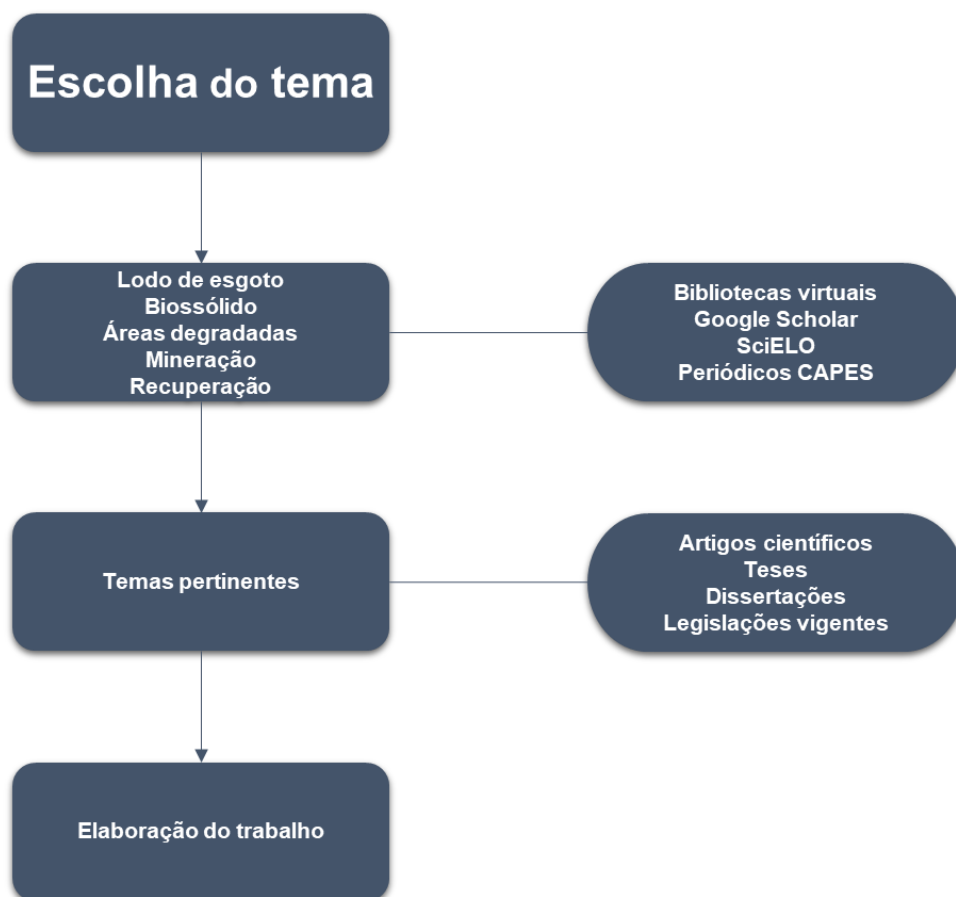
Além dos benefícios citados, essa técnica de utilização do lodo de esgoto sanitário em áreas degradadas pode ser considerada como uma alternativa promissora no que diz respeito à disposição final desse resíduo (OLIVEIRA, 2015).

## 4 METODOLOGIA

Para que os objetivos específicos sejam alcançados, o presente trabalho possui como metodologia a revisão bibliográfica de demais estudos sobre a aplicação do lodo de esgoto sanitário como forma de auxiliar o processo de recuperação ambiental de áreas degradadas pela mineração.

Sendo assim, nesta seção será apresentado o percurso metodológico no qual este trabalho se baseou, conforme a Figura 3.

**Figura 3** – Fluxograma metodológico da elaboração do trabalho.



Fonte: AUTOR (2022).

#### 4.1 Caracterização do lodo de esgoto sanitário

A partir da literatura, foi possível entender do que se trata o lodo de esgoto sanitário por meio da análise das concentrações de elementos químicos presentes em lodos de diferentes ETEs do Brasil, bem como as suas restrições de uso e adequações perante a legislação vigente.

As características do lodo de esgoto sanitário e a sua composição variam de acordo com o local de origem do esgoto a ser tratado, ou seja, há uma grande variabilidade no que diz respeito ao lodo de diferentes cidades, seja de uma ETE de uma área residencial ou de uma ETE de uma área industrial. Além de outros fatores, há também variabilidade quanto a época do ano em que o lodo foi coletado (OLIVEIRA, 2015).

Em estudo realizado por Artico (2018), o lodo de esgoto sanitário, proveniente de um sistema anaeróbio de tratamento realizado por um reator RALF (Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado), foi coletado na ETE Morada dos Eucaliptos da COMUSA (Companhia Municipal de Saneamento), na cidade de Novo Hamburgo, Rio Grande do Sul.

As amostras de lodo de esgoto sanitário do estudo de Artico (2018) foram coletadas em diferentes profundidades da caçamba onde ele fica armazenado a fim de que se integre uma amostra composta representativa de acordo com a NBR 10.007 (ABNT, 2004). Desta maneira, tais amostras foram posteriormente analisadas quanto as suas características químicas no laboratório de análises de solo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Em estudo realizado por Oliveira (2015), o método utilizado para se obter os valores das concentrações de substâncias inorgânicas presentes no lodo de esgoto sanitário se deu através de cálculos, os quais levam em conta:

- 1 Teor de matéria orgânica no substrato da área;
- 2 Espessura da camada arável e volume de substrato considerado;
- 3 Teor de matéria orgânica o qual se deseja atingir com a aplicação do lodo;
- 4 Teor de matéria orgânica e matéria seca no lodo e sua densidade.

Cabe ressaltar que o teor de matéria orgânica o qual se deseja atingir com a aplicação do lodo é baseado em estudo já realizado por Corrêa (2007) onde diz que “substratos minerados apresentam teores de matéria orgânica abaixo de 1% e aumentar esse valor para cerca de 2%, no mínimo, é essencial para o sucesso de uma revegetação”.

Com isso, Oliveira (2015) calculou a quantidade de lodo necessária por hectare, em base seca ( $NL_S$ ) e em base úmida ( $NL_U$ ) de acordo com as equações abaixo:

- Equação (1): Necessidade de lodo por hectare –  $NL_S$ :

$$NL_S = \frac{A \times CA \times DS \times (MO_D - MO_S)}{MO_L} \quad (1)$$

Onde:

$NL_S$  = Necessidade de lodo na base seca;

$A$  = 10000 ( $m^2$ );

$CA$  = Camada arável considerada (metros);

$DS$  = Densidade do solo em  $ton/m^3$  (considerada igual a 1);

$MO_D$  = Percentual de matéria orgânica desejada no solo (%);

$MO_S$  = Percentual de matéria orgânica atual do solo (%);

$MO_L$  = Percentual de matéria orgânica do lodo de esgoto (%)

- Equação (2): Necessidade de lodo por hectare – ( $NL_U$ ):

$$NL_U = \frac{NL_S}{TS \times \rho} \quad (2)$$

Onde:

$NL_U$  = Necessidade de biossólido, base úmida (ton/ha);

$NL_S$  = Necessidade de biossólido, base seca (ton/ha);

$TS$  = Teor de sólidos presentes no biossólido (%);

$\rho$  = Densidade do bioossólido (ton/m<sup>3</sup>).

A Tabela 3 apresenta os valores considerados por Oliveira (2015) para obtenção da taxa de aplicação do bioossólido seguindo a metodologia de Corrêa (2007).

**Tabela 3** – Valores considerados para o cálculo da taxa de aplicação de bioossólido.

| Parâmetros                              | Sigla            | Unidade            | Média<br>ETE Norte e ETE Sul |
|---|------------------|--------------------|------------------------------|
| <b>Área degradada:</b>                  |                  |                    |                              |
| Camada arável                           | CA               | m                  | 0,2                          |
| Área considerada                        | A                | m <sup>2</sup>     | 10.000                       |
| Densidade do solo                       | D <sub>S</sub>   | ton/m <sup>3</sup> | 1                            |
| % atual de matéria orgânica no solo     | %MO <sub>S</sub> | %                  | 0                            |
| % de matéria orgânica desejada no solo  | %MO <sub>D</sub> | %                  | 2                            |
| <b>Bioossólido:</b>                     |                  |                    |                              |
| % de matéria orgânica no bioossólido    | %MO <sub>L</sub> | %                  | 56,18                        |
| Densidade do bioossólido                | $\rho$           | ton/m <sup>3</sup> | 1,01                         |
| Teor de sólidos                         | TS               | %                  | 13,1                         |
| <b>Cálculo da taxa de aplicação:</b>    |                  |                    |                              |
| Necessidade de bioossólido (Base seca)  | NL <sub>s</sub>  | ton MS/ha          | 71,27                        |
| Necessidade de bioossólido (Base úmida) | NL <sub>U</sub>  | m <sup>3</sup> /ha | 538,56                       |

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2015).

Desta maneira, a partir da equação (1), Oliveira (2015), calculou as concentrações teóricas de substâncias inorgânicas presentes no lodo de esgoto sanitário aplicado ao solo.

Em estudo realizado por Amaral (2017), não foram realizadas análises químicas do lodo de esgoto sanitário utilizado. A composição química do lodo de esgoto sanitário aplicado ao solo foi fornecida pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB).

No estudo realizado por Sampaio (2010), foi utilizado o lodo de esgoto sanitário proveniente da ETE da cidade de Jundiaí, São Paulo. Os resultados da composição química do lodo foram disponibilizados pela própria empresa que administra a ETE de Jundiaí.

## **4.2 Parâmetros físicos e químicos do solo após a aplicação do lodo de esgoto sanitário**

Tomando como base a bibliografia utilizada neste trabalho, além de demais estudos encontrados na literatura, a presente seção aborda a influência nos parâmetros físicos e químicos do solo após a aplicação do lodo de esgoto sanitário ao comparar os lodos provenientes de diferentes ETEs.

Já é relatado que o principal efeito da aplicação do lodo de esgoto sanitário no solo é a melhoria relacionada à agregação das partículas, influenciando de maneira direta na diminuição da densidade, aumento da aeração e retenção de água no solo. Tais efeitos são justificados, principalmente, pela grande quantidade de matéria orgânica presente no lodo. Com relação aos aspectos químicos, o lodo de esgoto sanitário pode proporcionar um aumento dos teores de nutrientes, do carbono orgânico e do pH (NEVES, 2017).

No estudo realizado por Artico (2018), após toda a montagem do experimento, foram coletadas amostras dos solos utilizados e as mesmas foram encaminhadas para o Laboratório de Análises de Solos da UFRGS para caracterização. Tais análises foram feitas para determinar os teores de argila, pH, fósforo (P) e potássio (K) disponíveis, matéria orgânica, alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), zinco (Zn), cobre (Cu), boro (B) e manganês (Mn).

Realizado em uma jazida de cascalho, em Brasília, o estudo de Lima e Corrêa (2020) utilizou o lodo proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto Brasília Norte (ETEB Norte) para avaliar os efeitos da sua aplicação em um substrato minerado no Cerrado. As análises físicas do efeito do uso do lodo no solo se deram através da coleta desse substrato minerado com e sem a incorporação do lodo. A granulometria, por exemplo, foi analisada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997).

No estudo realizado por Oliveira (2015), foram coletadas amostras de solo em diferentes profundidades (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm e 30-40 cm) a fim de que sejam realizadas análises físicas, como por exemplo textura do solo e, análises

químicas, como teor de carbono e nitrogênio. Tais amostras foram analisadas no laboratório de bioquímica do solo da Faculdade de Agronomia e Veterinária (FAV) e também na Embrapa Cerrados.

O experimento realizado por Junio *et al.*, (2013), o qual teve como objetivo a avaliação da produtividade e dos teores de nutrientes no solo e na plantação de milho após a adubação com doses de lodo de esgoto sanitário, se deu em uma área experimental do Campus da UFMG, na cidade de Montes Claros, Minas Gerais. Na realização do experimento foi utilizado o lodo de esgoto sanitário proveniente de uma ETE operada pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) no município de Juramento, também em Minas Gerais. Após a aplicação do lodo, foi realizada a colheita de amostras de folhas de 20 plantas de cada unidade experimental. Após a colheita, foram coletadas amostras nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50cm, 30 subamostras a fim de que se forme uma amostra composta para analisar os teores de P, K, Ca, Mg, S e N.

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 Caracterização do lodo de esgoto sanitário

Após os estudos realizados por Artico (2018), foi obtida a Tabela 4, a qual apresenta os valores das concentrações de elementos químicos presentes no lodo de esgoto sanitário da ETE Morada dos Eucaliptos, na cidade de Novo Hamburgo. Além disso, a título de comparação, são apresentados também alguns resultados de diferentes ETEs do Brasil.

**Tabela 4** – Concentração de elementos químicos em lodos de ETEs e suas restrições de uso.

| Determinações            | ETE<br>Novo<br>Hamburgo | ETE<br>Curitiba | ETE<br>Jundiaí | ETE<br>Rio de<br>Janeiro | Conc. Máx. Permitida (mg/Kg)<br>CONAMA 498/2020 |          |
|--------------------------|-------------------------|-----------------|----------------|--------------------------|---|----------|
|                          |                         |                 |                |                          | Classe 1  | Classe 2 |
| Umidade (%)              | 60                      | -               | 55             | -                        | -   | -        |
| pH                       | 8                       | -               | 5              | -                        | -   | -        |
| Carbono orgânico (g/Kg)  | 88                      | -               | 200            | -                        | -   | -        |
| Nitrogênio - TKN (g/Kg)  | 9,5                     | -               | 25,3           | -                        | -   | -        |
| Relação C/N              | 9                       | -               | 7,9            | -                        | -   | -        |
| Fósforo total (g/Kg)     | 2,9                     | -               | 16,6           | -                        | -   | -        |
| Potássio total (g/Kg)    | 1,2                     | -               | 1,9            | -                        | -   | -        |
| Cálcio total (g/Kg)      | 9,1                     | -               | 12,1           | -                        | -   | -        |
| Magnésio total (g/Kg)    | 2,7                     | -               | 2,3            | -                        | -   | -        |
| Enxofre total (g/Kg)     | 6,2                     | -               | 19,2           | -                        | -   | -        |
| Ferro total (g/Kg)       | 17                      | -               | 25,95          | -                        | -   | -        |
| Manganês total (mg/Kg)   | 175                     | -               | 584            | -                        | -   | -        |
| Sódio total (g/Kg)       | 0,66                    | -               | 1,5            | -                        | -   | -        |
| Cobre total (mg/Kg)      | 69                      | 101             | 850            | 384                      | 1500  | 4300     |
| Zinco total (mg/Kg)      | 461                     | 515             | 573            | 620                      | 2800  | 7500     |
| Cádmio total (mg/Kg)     | <0,2                    | 0,303           | 8,24           | 3                        | 39  | 85       |
| Cromo total (mg/Kg)      | 31                      | 60,5            | 162,7          | 31                       | 1000  | 3000     |
| Níquel total (mg/Kg)     | 21                      | 37,4            | 37,8           | 13,8                     | 420   | 420      |
| Chumbo total (mg/Kg)     | 21                      | 22,5            | 196,4          | 139                      | 300   | 840      |
| Arsênio total (mg/Kg)    | 14                      | 0,005           | 0,1            | 3,7                      | 41  | 75       |
| Selênio total (mg/Kg)    | <4                      | 10,27           | -              | <1                       | 36  | 100      |
| Bário total (mg/Kg)      | 132                     | 130             | -              | 138                      | 1300  | 1300     |
| Molibdênio total (mg/Kg) | 0,7                     | 0,068           | -              | 9                        | 50  | 75       |
| Mercurio (mg/Kg)         | 0,2                     | 0               | <0,1           | <0,1                     | 17  | 57       |

Fonte: Adaptado de ARTICO (2018).



Por meio de análise da Tabela 4, é possível verificar que tanto o lodo proveniente da ETE Morada dos Eucaliptos, quanto das demais ETES apresentadas, apresentam valores abaixo dos limites permitidos pela legislação vigente. Tomando como foco o lodo de esgoto sanitário proveniente da ETE de Novo Hamburgo, pode-se afirmar que o experimento realizado por Artico (2018) não apresenta risco de contaminação ambiental por substâncias químicas.

Os dados obtidos por meio da equação (1), no estudo realizado por Oliveira (2015), indicou outros valores das concentrações teóricas das substâncias inorgânicas presentes no lodo de esgoto sanitário aplicado ao solo, os quais estão expressos na Tabela 5.

**Tabela 5** – Concentrações teóricas de substâncias inorgânicas incorporadas ao solo através da aplicação do lodo de esgoto sanitário.

| Parâmetros                      | Resultados |          | Limites (kg/ha)<br>CONAMA 498/2020 |                      |
|---------------------------------|------------|----------|------------------------------------|----------------------|
|                                 | ETEB Norte | ETEB Sul | Áreas degradadas                   | Áreas não degradadas |
| <b>Antimônio total (kg/ha)</b>  | 2,01       | 1,66     | -                                  | -                    |
| <b>Arsênio total (kg/ha)</b>    | 0,21       | 0,17     | 20                                 | 41                   |
| <b>Bário total (kg/ha)</b>      | 8,92       | 6,68     | 130                                | 260                  |
| <b>Cádmio total (kg/ha)</b>     | 0,26       | 0,28     | 19                                 | 39                   |
| <b>Chumbo total (kg/ha)</b>     | 2,03       | 2,49     | 150                                | 300                  |
| <b>Cobre total (kg/ha)</b>      | 17,11      | 12,46    | 750                                | 1500                 |
| <b>Cromo total (kg/ha)</b>      | 2,32       | 2,80     | 1500                               | 3000                 |
| <b>Mercúrio total (kg/ha)</b>   | 0,56       | 0,09     | 8,5                                | 17                   |
| <b>Molibdênio total (kg/ha)</b> | 1,28       | 1,07     | 6,5                                | 13                   |
| <b>Níquel total (kg/ha)</b>     | 1,45       | 1,56     | 210                                | 420                  |
| <b>Selênio total (kg/ha)</b>    | 1,04       | 0,86     | 50                                 | 100                  |
| <b>Zinco total (kg/ha)</b>      | 52,49      | 58,56    | 1400                               | 2800                 |

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2015).

Assim como no estudo realizado por Artico (2018), as concentrações de lodo de esgoto sanitário aplicadas ao solo do referido trabalho de Oliveira (2015), também se encontram em conformidade com a legislação vigente.

No trabalho de Amaral (2017) não foram realizadas análises da composição do lodo de esgoto sanitário estudado. Os dados, obtidos em porcentagens de elementos inorgânicos presentes no lodo de esgoto sanitário, foram disponibilizados pela CAESB, conforme descrito na Tabela 6.

**Tabela 6** – Porcentagens de elementos químicos presentes no lodo de esgoto sanitário utilizado nos experimentos.

| <b>Parâmetros</b>             | <b>Unidade ETEB Sul</b> |       |
|-------------------------------|-------------------------|-------|
| <i>pH</i>                     | %                       | 7,23  |
| <i>Umidade</i>                | %                       | 86,6  |
| <i>Fósforo total</i>          | %                       | 4,66  |
| <i>Matéria orgânica total</i> | %                       | 54,41 |
| <i>Carbono orgânico total</i> | %                       | 30,92 |
| <i>Enxofre</i>                | %                       | 13,4  |
| <i>Sólidos totais</i>         | %                       | 4,1   |
| <i>Sólidos totais fixos</i>   | %                       | 9,3   |
| <i>Cálcio total</i>           | %                       | 2,03  |
| <i>Magnésio total</i>         | %                       | 1,83  |
| <i>Potássio total</i>         | %                       | 0,68  |
| <i>Sódio total</i>            | %                       | 0,25  |
| <i>Alumínio total</i>         | %                       | 3,3   |
| <i>Ferro total</i>            | %                       | 2,44  |

Fonte: Adaptado de AMARAL (2017).

A composição química do lodo e esgoto utilizado no experimento de Sampaio (2010) está descrita na Tabela 7 e indica que na análise da composição química do lodo, foi possível observar que todos os parâmetros se encontravam dentro da legislação vigente, corroborando com os dados de Artico (2018) e Oliveira (2015), os quais confirmam que não houve risco de contaminação ambiental no lodo estudado.

**Tabela 7** – Composição química do lodo de esgoto sanitário da ETE de Jundiaí.

| Determinações           | ETE<br>Jundiaí | Conc. Máx. Permitida<br>(mg/Kg)<br>CONAMA 498/2020 |          |
|-------------------------|----------------|--|----------|
|                         |                | Classe 1   | Classe 2 |
| Umidade (%)             | 55             | -  | -        |
| pH                      | 5              | -  | -        |
| Carbono orgânico (g/Kg) | 200            | -  | -        |
| Nitrogênio (g/Kg)       | 25,3           | -  | -        |
| Relação C/N             | 7,9            | -  | -        |
| Fósforo(g/Kg)           | 16,6           | -  | -        |
| Potássio (g/Kg)         | 1,9            | -  | -        |
| Cálcio (g/Kg)           | 12,1           | -  | -        |
| Magnésio (g/Kg)         | 2,3            | -  | -        |
| Enxofre (g/Kg)          | 19,2           | -  | -        |
| Ferro (g/Kg)            | 25,95          | -  | -        |
| Manganês (mg/Kg)        | 584            | -  | -        |
| Sódio (g/Kg)            | 1,5            | -  | -        |
| Cobre (mg/Kg)           | 850            | 1500   | 4300     |
| Zinco (mg/Kg)           | 573            | 2800   | 7500     |
| Cádmio (mg/Kg)          | 8,24           | 39   | 85       |
| Cromo (mg/Kg)           | 162,7          | 1000   | 3000     |
| Níquel (mg/Kg)          | 37,8           | 420  | 420      |
| Chumbo (mg/Kg)          | 196,4          | 300  | 840      |
| Arsênio (mg/Kg)         | 0,1            | 41   | 75       |
| Selênio (mg/Kg)         | -              | 36   | 100      |
| Bário (mg/Kg)           | -              | 1300   | 1300     |
| Molibdênio (mg/Kg)      | -              | 50   | 75       |
| Mercurio (mg/Kg)        | <0,1           | 17   | 57       |

Fonte: Adaptado de SAMPAIO (2010).

## 5.2 Alterações nos parâmetros físicos e químicos do solo após a aplicação do lodo de esgoto sanitário

A Tabela 8 ilustra a distribuição granulométrica existente nos tratamentos A (rejeito de mineração 0,1% matéria orgânica), B (rejeito de mineração + lodo de esgoto 1,8% matéria orgânica) e C (rejeito de mineração + lodo de esgoto 3,2% matéria orgânica), os quais foram analisados no estudo realizado por Artico (2018).

**Tabela 8** – Distribuição granulométrica dos tratamentos.

| <b>Granulometria (%)</b> | <b>A</b>                | <b>B</b>                     | <b>C</b>                     |
|--------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                          | <b>RM<br/>(0,1% MO)</b> | <b>RM + LE<br/>(1,8% MO)</b> | <b>RM + LE<br/>(3,2% MO)</b> |
| <b>Areia grossa</b>      | 77,50                   | 65,13                        | 72,92                        |
| <b>Areia fina</b>        | 7,40                    | 18,35                        | 10,60                        |
| <b>Silte</b>             | 11,90                   | 12,20                        | 12,30                        |
| <b>Argila</b>            | 3,20                    | 4,32                         | 4,18                         |

Fonte: Adaptado de ARTICO (2018).

A matéria orgânica presente no lodo de esgoto sanitário do trabalho de Artico (2018) causou melhoria no que diz respeito a agregação de partículas do solo, proporcionando um aumento da aeração e uma diminuição da sua densidade. Os solos dos tratamentos acima são considerados arenosos e, segundo Fageria e Stone (2006), os solos de textura grosseira apresentam menor capacidade de retenção de água e maiores capacidades de infiltração e percolação, quando comparados a solos de textura mais fina.

No estudo realizado por Lima e Corrêa (2020), a aplicação do lodo de esgoto sanitário em um solo degradado, possibilitou, assim como no estudo de Artico (2018), uma redução da sua densidade. Tal redução contribui com o aumento da porosidade do solo, numa proporção de quase 50% quando comparado ao solo sem o tratamento com o lodo, devido à incorporação da matéria orgânica. Com relação à granulometria do solo, houve pouca diferença entre os tratamentos com e sem a aplicação do lodo, conforme mostra a Tabela 9. O substrato o qual sofreu a incorporação do lodo possui apenas 15 anos de desenvolvimento, considerando que o seu processo pedogenético se iniciou após essa incorporação, e considerando que o referido substrato era estéril, não foi possível ainda, observar as alterações granulométricas.

**Tabela 9** – Caracterização da granulometria dos diferentes tratamentos estudados.

| Granulometria (%)   | Tratamento sem    | Tratamento com    |
|---------------------|-------------------|-------------------|
|                     | aplicação de lodo | aplicação de lodo |
| <b>Areia grossa</b> | 33,2              | 28,9              |
| <b>Areia fina</b>   | 11,1              | 8,1               |
| <b>Silte</b>        | 29,1              | 37,0              |
| <b>Argila</b>       | 26,7              | 26,0              |

Fonte: Adaptado de LIMA e CORRÊA (2020).

No que diz respeito às alterações químicas provocadas no solo, a Tabela 10 mostra os valores médios obtidos para acidez, matéria orgânica e macro e micronutrientes presentes nos tratamentos analisados no estudo de Artico (2018).

**Tabela 10** – Variações químicas dos tratamentos (A), (B) e (C).

| Parâmetros              | Unidade             | A               | B                    | C                    |
|-------------------------|---------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
|                         |                     | RM<br>(0,1% MO) | RM + LE<br>(1,8% MO) | RM + LE<br>(3,2% MO) |
| <b>pH</b>               | -                   | 6,78            | 5,66                 | 5,28                 |
| <b>Alumínio</b>         | mol/dm <sup>3</sup> | 0,00            | 0,00                 | 0,10                 |
| <b>Matéria orgânica</b> | %                   | 0,10            | 2,04                 | 2,68                 |
| <b>Fósforo</b>          | mg/dm <sup>3</sup>  | >100            | >100                 | >100                 |
| <b>Potássio</b>         | mg/dm <sup>3</sup>  | 54,80           | 44,60                | 43,80                |
| <b>Cálcio</b>           | mol/dm <sup>3</sup> | 19,20           | 18,38                | 19,48                |
| <b>Magnésio</b>         | mol/dm <sup>3</sup> | 8,66            | 7,18                 | 6,90                 |
| <b>Enxofre</b>          | mg/dm <sup>3</sup>  | 6,32            | 120,40               | 660,60               |
| <b>Cobre</b>            | mg/dm <sup>3</sup>  | 1,22            | 4,50                 | 5,16                 |
| <b>Zinco</b>            | mg/dm <sup>3</sup>  | 5,18            | 25,60                | 35,40                |
| <b>Manganês</b>         | mg/dm <sup>3</sup>  | 5,40            | 30,60                | 49,20                |
| <b>Boro</b>             | mg/dm <sup>3</sup>  | 0,08            | 0,26                 | 0,36                 |

Fonte: Adaptado de ARTICO (2018).

Os tratamentos (B) e (C), os quais receberam adição de lodo de esgoto sanitário, apresentaram maior acidez, quando comparado ao tratamento (A). Tal justificativa encontrada no trabalho de Artico (2018) pode estar relacionada à adição do lodo, visto

que a matéria orgânica fornece prótons  $H^+$ , os quais possuem a tendência de acidificar solos. Cabe ressaltar que um tratamento preliminar ao lodo, como por exemplo a calagem, a qual promove a desinfecção e estabilização do lodo, tende a evitar a redução do pH (CORRÊA; CORRÊA, 2003).

Demais estudos apontam que os solos os quais recebem a adição de biossólidos devem apresentar pH entre 5,5 e 7,0, portanto, com exceção ao tratamento (C), os tratamentos do estudo de Artico (2018) se enquadram nessa afirmação.

Com relação a saturação de alumínio, o único tratamento do trabalho realizado por Artico (2018) que obteve valor (o qual era esperado), foi o tratamento (C), visto que ele possui pH inferior a 5,5. Como nos demais tratamentos, o valor de saturação de alumínio se manteve abaixo de 1%, valor determinado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (2004).

Com relação ao aumento da matéria orgânica, esse fato se deu justamente pela adição do lodo de esgoto sanitário ao rejeito de mineração em substituição ao solo de cobertura. A estabilização desses teores de matéria orgânica auxilia na recuperação de áreas degradadas pois ocorre acúmulo e fixação de carbono no solo, o qual é fundamental para o equilíbrio microbiano, retenção de umidade e adsorção de nutrientes, como por exemplo nitrogênio, enxofre e fósforo (ARTICO, 2018). Sendo assim, o uso do lodo de esgoto sanitário combinado com o rejeito de mineração, foi possível suprir a demanda de nitrogênio necessária para as plantas testadas no experimento realizado por Artico (2018).

Nos tratamentos (A), (B) e (C) de Artico (2018), os teores de fósforo estão acima de  $100\text{mg/dm}^3$ , sendo então considerados elevados. Já o potássio, apresentou valores menores nos tratamentos (B) e (C), quando comparados ao tratamento (A), portanto, os tratamentos onde houve adição de lodo de esgoto sanitário não obtiveram aumento da concentração de potássio, se mantendo baixos, como na caracterização química do lodo de esgoto sanitário utilizado no estudo.

Os teores de enxofre são mais elevados nos tratamentos (B) e (C), visto que existem maiores concentrações de S no lodo de esgoto sanitário e os mesmos são considerados como altos pela SBCS (2004) pois estão acima de  $5,0\text{mg/dm}^3$ . Os teores

de cálcio e de magnésio não apresentaram grandes variações nos três tratamentos, porém a SBCS (2004) os considera como altos, pois possuem teores maiores do que  $4\text{mol/dm}^3$ .

Com relação aos teores de cobre, zinco, manganês e boro, estes foram maiores nos dois tratamentos onde houve adição de lodo de esgoto sanitário.

Através dos resultados obtidos por Artico (2018), pode-se ter uma relação de que quanto maior o pH do solo, menor a disponibilidade de Cu, Zn e Mn. Nos tratamentos (B) e (C), os quais possuem pH menor, foi possível verificar que a disponibilidade de Cu, Zn e Mn foi maior do que no tratamento (A).

Através dos resultados obtidos no estudo de Artico (2018), foi possível verificar que a adição de lodo de esgoto sanitário ao rejeito de mineração influenciou no aumento do teor de micronutrientes do solo.

No estudo realizado por Oliveira (2015) foi possível obter as diferentes concentrações de nutrientes para as duas áreas em estudo: “área degradada” e “área degradada + lodo de esgoto”. Tais concentrações estão explicitadas na Tabela 11.

**Tabela 11** – Concentrações de elementos químicos presentes em diferentes profundidades do solo de área degradada e área tratada com lodo de esgoto sanitário.

| Manejo                                 | Parâmetro | Unidade             | Profundidade (cm) |       |       |       |
|--|-----------|---------------------|-------------------|-------|-------|-------|
|  |           |                     | 0-10              | 10-20 | 20-30 | 30-40 |
| <b>Área degradada</b>                  | C         | g/Kg                | 16,71             | 14,91 | 15,33 | 14,54 |
|  | pH        | -                   | 4,91              | 4,79  | 5,00  | 4,79  |
|  | Ca        | mol/dm <sup>3</sup> | 1,68              | 1,04  | 0,79  | 0,71  |
|  | Mg        | mol/dm <sup>3</sup> | 0,021             | 0,015 | 0,015 | 0,036 |
|  | Cu        | mol/dm <sup>3</sup> | 0,03              | 0,02  | 0,02  | 0,02  |
|  | Al        | mg/dm <sup>3</sup>  | 1,30              | 1,30  | 1,20  | 1,23  |
|  | K         | mg/dm <sup>3</sup>  | 2,33              | 1,67  | 2,00  | 1,00  |
|  | P         | mg/dm <sup>3</sup>  | 0,76              | 0,70  | 0,69  | 0,59  |
|  | Mn        | mg/dm <sup>3</sup>  | 0,80              | 0,90  | 1,00  | 1,03  |
|  | Fe        | mg/dm <sup>3</sup>  | 18,37             | 17,67 | 18,70 | 17,47 |
|  | Zn        | mg/dm <sup>3</sup>  | 0,52              | 0,37  | 0,23  | 0,27  |
| <b>Área degradada + Lodo de esgoto</b> | C         | g/Kg                | 22,36             | 17,63 | 16,77 | 16,88 |
|  | pH        | -                   | 4,82              | 4,74  | 5,28  | 5,37  |
|  | Ca        | mol/dm <sup>3</sup> | 1,06              | 0,78  | 0,66  | 0,56  |
|  | Mg        | mol/dm <sup>3</sup> | 0,28              | 0,25  | 0,23  | 0,29  |
|  | Cu        | mol/dm <sup>3</sup> | 5,83              | 2,43  | 1,07  | 1,00  |
|  | Al        | mg/dm <sup>3</sup>  | 0,078             | 0,126 | 0,001 | 0,009 |
|  | K         | mg/dm <sup>3</sup>  | 44,00             | 20,67 | 13,33 | 19,33 |
|  | P         | mg/dm <sup>3</sup>  | 564,70            | 23,21 | 3,54  | 1,37  |
|  | Mn        | mg/dm <sup>3</sup>  | 3,17              | 1,73  | 0,93  | 2,97  |
|  | Fe        | mg/dm <sup>3</sup>  | 104,33            | 34,03 | 19,77 | 16,67 |
|  | Zn        | mg/dm <sup>3</sup>  | 24,67             | 6,00  | 1,60  | 0,87  |

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2015).

Em geral, a incrementação de compostos orgânicos ao solo, realizado por Oliveira (2015), aumenta a sua concentração de carbono, fato também observado em outros estudos.

Foi possível observar no estudo de Oliveira (2015) o aumento do pH do solo após a aplicação do lodo, fato que pode ser justificado pela alcalinidade dos materiais que são utilizados nos processos de estabilização do lodo e de redução de patógenos, como por exemplo a cal hidratada (Ca(OH)<sup>2</sup>).

Os valores de potássio encontrados após a aplicação do lodo são considerados elevados, mesmo que segundo Junio *et al.*, (2013), o lodo de esgoto sanitário seja uma matéria prima a qual apresenta baixas concentrações de K.



Tanto os teores de cálcio, quanto de fósforo obtiveram relativo aumento somente na camada superficial do solo (0 – 10cm). Ferro e zinco também obtiveram aumento das suas concentrações. Fazendo uma comparação com o estudo de Artico (2018), no estudo de Oliveira (2015) também foi comprovada a afirmação de que os teores de Zn são sempre afetados após a aplicação do lodo de esgoto sanitário.

Os teores de fósforo obtiveram um aumento considerável na camada superficial do solo, confirmando o que já foi observado em estudos passados.

Como o lodo de esgoto sanitário está sujeito à intensa degradação aeróbia e anaeróbia nas ETEs, a dinâmica dos seus nutrientes está condicionada à qualidade do lodo (OLIVEIRA, 2015).

No estudo de Junio *et al.*, (2013), conforme mostrado na Tabela 12, fica evidente que após a incorporação do lodo de esgoto sanitário ao solo, o teor de nitrogênio na camada de 0-20cm foi mais elevado. Para os elementos potássio, cálcio, magnésio e enxofre, foi verificado um teor mais elevado desses elementos na superfície do solo, havendo uma diminuição à medida que aumenta a profundidade.

O enxofre é considerado como um elemento de fácil movimentação no solo quando aplicado junto ao fósforo e em condições onde o pH é mais elevado (JUNIO *et al.*, 2013). Porém, segundo Luchese, Costa e Júnior (2008), quando o enxofre é aplicado como um componente da matéria orgânica, há uma forte tendência de ele ser imobilizado pelos microrganismos decompositores presentes na matéria orgânica, e, com isso, o enxofre passa a se concentrar na camada de incorporação do solo. Os teores de magnésio no solo, devido a sua menor concentração no lodo, não foram influenciados pela aplicação do bio sólido. Segundo Junio *et al.*, (2013), a melhoria da qualidade do solo após a aplicação do bio sólido, também pode ser confirmada por outros estudos, como os de Nascimento *et al.*, (2004) e Chueiri *et al.*, (2007).

**Tabela 12** – Teores de nutrientes no solo antes e após a aplicação do lodo de esgoto sanitário.

| Manejo                    | Parâmetro | Unidade                  | Profundidade (cm) |        |        |        |
|---------------------------|-----------|--------------------------|-------------------|--------|--------|--------|
|                           |           |                          | 0-10              | 10-20  | 20-30  | 30-40  |
| <b>Sem adição de lodo</b> | <i>N</i>  | <i>mg/dm<sup>3</sup></i> | 118,97            | 149,86 | 111,59 | 101,80 |
|                           | <i>P</i>  | <i>mg/dm<sup>3</sup></i> | 4,13              | 1,30   | 2,10   | 0,27   |
|                           | <i>K</i>  | <i>mg/dm<sup>3</sup></i> | 145,67            | 71,83  | 37,17  | 24,33  |
|                           | <i>Ca</i> | <i>mg/dm<sup>3</sup></i> | 895,79            | 549,10 | 266,53 | 160,32 |
|                           | <i>Mg</i> | <i>mg/dm<sup>3</sup></i> | 143,44            | 109,40 | -      | -      |
|                           | <i>S</i>  | <i>mg/dm<sup>3</sup></i> | 33,05             | 27,58  | 27,14  | 15,62  |
| <b>Com adição de lodo</b> | <i>N</i>  | <i>mg/dm<sup>3</sup></i> | 127,20            | 105,58 | 105,27 | 91,07  |
|                           | <i>P</i>  | <i>mg/dm<sup>3</sup></i> | 29,17             | 12,80  | 3,65   | 1,20   |
|                           | <i>K</i>  | <i>mg/dm<sup>3</sup></i> | 141,83            | 85,67  | 40,67  | 25,00  |
|                           | <i>Ca</i> | <i>mg/dm<sup>3</sup></i> | 1010,20           | 664,13 | 328,07 | 184,04 |
|                           | <i>Mg</i> | <i>mg/dm<sup>3</sup></i> | 123,99            | 115,48 | -      | -      |
|                           | <i>S</i>  | <i>mg/dm<sup>3</sup></i> | 93,02             | 61,70  | 50,62  | 32,62  |

**Fonte:** Adaptado de JUNIO *et al.*, (2013).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista a problemática relacionada à melhoria das condições de solos de áreas degradadas pelas atividades relacionadas à mineração, a utilização do lodo proveniente das estações de tratamento de esgoto sanitário como forma de auxiliar nos processos de recomposição de nutrientes desses solos, tem se tornado cada vez mais comuns. Deste modo, propôs-se um trabalho que teve como objetivo geral realizar um levantamento bibliográfico de estudos preexistentes acerca da aplicabilidade e utilização do lodo de esgoto sanitário no auxílio à recuperação de áreas degradadas pela mineração. Especificamente, objetivou-se: a) analisar as orientações vigentes da legislação quanto ao uso e aplicação do lodo de esgoto sanitário para a recuperação do solo; b) caracterizar o perfil físico e químico do lodo de esgoto sanitário urbano; c) avaliar os parâmetros químicos e físicos do solo após a aplicação do lodo de esgoto sanitário.

A Resolução CONAMA nº 498/2020, ato normativo vigente acerca da aplicação de biossólidos em solos, apresenta limites máximos permitidos de substâncias químicas no biossólido a ser destinado para uso em solos, além da carga máxima anual de substâncias químicas acumuladas por hectare durante um ano. Desta maneira, lodos de esgoto que se enquadram em tais parâmetros presentes na legislação podem ser aplicados em áreas degradadas pela mineração.

Após o levantamento bibliográfico de estudos preexistentes acerca da temática abordada, foi possível concluir que o perfil físico e químico dos lodos de esgoto sanitário dos diferentes experimentos apresentados se adequava à legislação vigente, em termos de aplicação sobre o solo de áreas degradadas. Além disso, deve-se salientar também que em todos os estudos não houve contaminação do solo devido à aplicação do lodo.

No que diz respeito às alterações físicas e químicas do solo após a aplicação do lodo de esgoto sanitário, foi possível identificar aumento da acidez do solo nos tratamentos onde o lodo utilizado não sofreu processo de calagem, que visa a redução de patógenos. Houveram variações dos teores de micronutrientes do solo, como por exemplo fósforo, potássio, magnésio, enxofre, cobre, zinco, manganês e boro. Tais variações, como aumento e diminuição em alguns casos, estão relacionadas aos

processos de tratamento do lodo antes da sua incorporação ao solo e também às suas características químicas após o tratamento de esgoto utilizado nas ETEs.

De um modo geral, a aplicação do lodo de esgoto sanitário em áreas degradadas pela mineração tende a ser eficiente no que diz respeito ao fornecimento de nutrientes, necessários ao crescimento da vegetação, em solos onde há escassez de tais nutrientes. Além disso, a aplicação do lodo em áreas degradadas, torna-se uma alternativa interessante para aplicação na problemática relacionada à disposição final desse resíduo proveniente das estações de tratamento de esgoto.

Apesar da escassez de trabalhos que estudem especificamente a aplicação do lodo de esgoto sanitário em áreas degradadas pela mineração, tal método tende a se tornar algo promissor, visto que os resultados obtidos favorecem a sua utilização em solos degradados, podendo tornar os métodos atuais de recuperação de áreas degradadas mais sustentáveis.

Deste modo, recomenda-se que sejam realizados mais estudos acerca da utilização do lodo de esgoto sanitário como forma de auxiliar no processo de recuperação de áreas degradadas pela mineração, como por exemplo a análise da presença de patógenos no lodo de esgoto sanitário incorporado ao solo, além da análise do crescimento da vegetação após a aplicação do lodo de esgoto sanitário em solos de áreas degradadas.

## 7 CONCLUSÃO

Dentro do proposto como objetivo geral do presente trabalho, foi possível a realização de um levantamento bibliográfico de diferentes estudos sobre a aplicabilidade e utilização do lodo de esgoto sanitário no auxílio à recuperação de áreas degradadas pela mineração.

Em todos os trabalhos analisados, as características químicas dos lodos de esgoto sanitário estavam em consonância com o descrito na legislação vigente sobre a aplicação de biossólidos em áreas degradadas.

Após a aplicação do lodo de esgoto sanitário em solos de áreas degradadas, foram observadas diversas alterações nos parâmetros físicos e químicos dos solos receptores de lodo de esgoto sanitário, alterações consideradas favoráveis à melhoria da qualidade desses solos, favorecendo então o processo de revegetação dos mesmos.

Finalmente podemos inferir que a aplicação do lodo de esgoto sanitário como estratégia para auxiliar no processo de recuperação de solos em áreas degradadas, pode ser economicamente viável, além de ser um método promissor e com excelente apelo ambiental. Recomenda-se que estudos experimentais sejam desenvolvidos a fim de melhor elucidar os benefícios da aplicação dessa técnica no contexto das áreas degradadas pela mineração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 13030: Elaboração e apresentação de projeto de reabilitação de áreas degradadas pela mineração.** Rio de Janeiro. 1999.

ABNT. **NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro. 2004.

AMARAL, T. C. **Invertebrados epígeos como indicadores de recuperação de área degradada tratada com lodo de esgoto e resíduos de poda de árvores.** Universidade de Brasília. Brasília, p. 81. 2017.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** 1ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, v. 6, 2001. p. 484.

ARTICO, M. **Recuperação de áreas degradadas através do uso integrado de lodo de esgoto e rejeito de mineração de basalto como substituto ao solo de cobertura.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 121. 2018.

BITTENCOURT, S. **Gestão do processo de uso agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná: Aplicabilidade da Resolução CONAMA 375/06.** Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 257. 2014.

BRASIL. Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981, que Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 1981. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l6938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm). Acesso em: 17 Maio 2022.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, §1º, incisos I, II, III e IV da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 2000. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9985.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm). Acesso em: 19 Julho 2022.

CHUEIRI, W. A. *et al.* Lodo de esgoto e fertilizante mineral sobre parâmetros do solo e de plantas de trigo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 5, p. 502-508, Maio. 2007.

CONAMA. Resolução n. 1, de 23 de janeiro de 1986. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**, 1986. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>. Acesso em: 17 Maio 2022.

CONAMA. Resolução n. 375, de 29 de agosto de 2006. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**, 2006. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=497](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=497). Acesso em: 27 Julho 2022.

CONAMA. Resolução n. 498, de 19 de agosto de 2020. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**, 2020. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=797](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=797). Acesso em: 18 Maio 2022.

CORRÊA, R. S. **Recuperação de áreas degradadas pela mineração no Cerrado: manual para revegetação**. Brasília. 2007.

CORRÊA, R. S.; CORRÊA, A. S. Eficiência agronômica e produção vegetal de cinco biofertilizantes aplicados a dois solos tropicais. **Revista Técnica da Sanepar**, Curitiba, v. 20, n. 20, p. 49-57, 2003.

CURI, A. **Lavra de Minas**. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. p. 462.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 1997. p. 212.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Qualidade do solo e meio ambiente. **Embrapa Arroz e Feijão**, Santo Antônio de Goiás, 30 Abril 2006., p. 35

IBAMA. **Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: técnicas de revegetação**. Brasília, p. 96. 1990.

IBAMA. **Instrução Normativa IBAMA nº 04, de 13 de abril de 2011. Estabelece procedimentos para elaboração de Projeto de Recuperação de Área Degradada - PRAD**. Brasília. 2011.

IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. Brasília, p. 128. 2016.

JUNIO, G. R. Z. *et al.* Produtividade de milho adubado com composto de lodo de esgoto e fosfato natural de Gafsa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 7, p. 706-712, Abril. 2013.

KRIGUEL, K. *et al.* Determinação da difusividade térmica do lodo proveniente do tratamento anaeróbio de esgoto doméstico. **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, n. 28, Outubro. 2015.

LEMOS, E. C. **Recuperação de Área Degradada Pela Atividade Minerária: Análise da Efetividade Legal em Minas Gerais**. UFLA. Lavras, p. 234. 2016.

LIMA, T. P. M. D.; CORRÊA, R. S. Efeitos do uso do lodo de estações de tratamento de esgoto sobre a disponibilidade de água em um substrato minerado no Cerrado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Planaltina, v. 26, n. 2, p. 301-308, Fevereiro. 2020. ISSN ISSN 1809-4457.

LUCHESE, A. V.; COSTA, A. C. S. D.; JÚNIOR, I. G. S. Lixiviação de íons após a aplicação de resíduos orgânicos de uma indústria farmoquímica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 189-199, Setembro. 2008.

MARTINS, P. F. C. *et al.* Recuperação de pastagens degradadas com utilização de bio sólido e Moringa Oleífera: Revisão. **Pubvet Medicina Veterinária e Zootecnia**, Campo Grande, v. 16, n. 2, p. 1-17, Fevereiro. 2022.

MARTINS, S. V. **Recuperação de áreas degradadas: ações em áreas de preservação permanente, voçorocas, taludes rodoviários e de mineração**. 5. ed. Viçosa: Aprenda fácil, 2021.

MOTA, M. V. S. **Insetos mastigadores, polinizadores e predadores em plantas de Acacia Auriculiformis A. Cunn. Ex Benth (Fabales: Fabaceae) fertilizada com lodo de esgoto desidratado**. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Diamantina, p. 45. 2022.

NASCIMENTO, C. W. A. *et al.* Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após a aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Recife, v. 28, n. 2, p. 385-392, Fevereiro. 2004.



NEVES, T. I. **Aproveitamento energético do biossólido gerado por indústria têxtil como fertilizante para produção de capim-elefante - *Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone**. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, p. 114. 2017.

NOGUEIRA, N. O. *et al.* Utilização de leguminosas para recuperação de áreas degradadas. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 8, p. 2121, 2012.

OLIVEIRA, D. N. S. D. **Efeito do Lodo de Esgoto e de Plantas de Cobertura na Recuperação de uma Área Degradada em Brasília DF**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 61. 2015.

OLIVEIRA, L. S. D. **Utilização de lodo de esgoto associado a três espécies nativas do cerrado na recuperação de áreas degradadas**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 61. 2015.

PEDROZA, M. M. *et al.* Produção e tratamento de lodo de esgoto - uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. XI, n. 16, p. 89-188, Jul./Dez. 2010.

POLAT, E.; DEMIR, H.; ERLER, F. Yield and quality criteria in organically and conventionally grown tomatoes in Turkey. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 4, p. 424-429, 2010.

SAMPAIO, T. F. **Crescimento de espécies nativas da Mata Atlântica, modificações de atributos físicos do solo e de metais pesados no solo e na planta, em resposta à aplicação de lodo de esgoto**. Universidade Estadual Paulista. Botucatu, p. 84. 2010.

SANCHEZ, L. E. **Desengenharia: o passivo ambiental na desativação de empreendimentos industriais**. São Paulo: EDUSP, 2001. p. 254.

SANTOS, K. B. D. **Integração de lodo de ETE a resíduo de mineração de basalto para recuperação de áreas degradadas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 61. 2017.

SBCS. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: [s.n.], 2004.

USEPA. Standards for the use or disposal of sewage sludge. **Discover U.S. Government Information**, Washington, 1995. Disponível em: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-1995-10-25/pdf/95-25776.pdf>. Acesso em: 28 Julho 2022.

VASQUEZ, B. A. F. **Produção de solo a partir de rejeito de carvão mineral.**  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 172. 2015.