



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"

Programa Interunidades

unesp 

Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

JUSCIMARA RODRIGUES SILVA

**LODOS DE ETAS: POTENCIAIS IMPACTOS, EFEITOS DA
SECAGEM TÉRMICA E PERCOLAÇÃO DE METAIS PESADOS
EM ATERROS EXCLUSIVOS, SANITÁRIOS E OBRAS
GEOTÉCNICAS.**

Bauru
2024



JUSCIMARA RODRIGUES SILVA

**LODOS DE ETAS: POTENCIAIS IMPACTOS, EFEITOS DA
SECAGEM TÉRMICA E PERCOLAÇÃO DE METAIS PESADOS
EM ATERROS EXCLUSIVOS, SANITÁRIOS E OBRAS
GEOTÉCNICAS.**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Saneamento.

Orientadora: Prof. Dra. Fabiana Alves Fiore Pinto

Co-orientadora: Amanda Maria Dantas de Jesus

Bauru
2024



Silva, Juscimara Rodrigues.

Lodos de ETAS: Potenciais Impactos, Efeitos da Secagem Térmica e Percolação de Metais Pesados em Aterros Exclusivos, Sanitários e Obras Geotécnicas. / Juscimara Rodrigues Silva. - Bauru, 2024
90 f. : il.

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental

Orientadora: Fabiana Alves Fiore

1. Lodo de ETA. 2. Secagem Térmica. 3. Disposição de LETAs. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE JUSCIMARA RODRIGUES SILVA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 03 dias do mês de maio do ano de 2024, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de JUSCIMARA RODRIGUES SILVA, intitulada **ANÁLISE DOS ASPECTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS À DISPOSIÇÃO FINAL DE LODOS DE ETAS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof^ª. Dr^ª. FABIANA ALVES FIORE PINTO (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de São José dos Campos, Prof.^ª Dr.^ª GRAZIELE RUAS LAGOAS DA SILVA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia - UNESP - Câmpus de Bauru, Prof^ª Dr^ª CALI LAGUNA ACHON (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos - UFSCar. Após a exposição pela mestrandia e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADA . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof^ª. Dr^ª. FABIANA ALVES FIORE PINTO

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DA ALUNA: **JUSCIMARA RODRIGUES SILVA**

DE: "ANÁLISE DOS ASPECTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS À DISPOSIÇÃO FINAL DE LODOS DE ETAS"

PARA:

Lodos de ETAs: potenciais impactos, efeitos da secagem térmica e percolação de metais pesados em aterros exclusivos, sanitários e obras geotécnicas.

Bauru, 03 de maio de 2024.

Prof^a. Dr^a. FABIANA ALVES FIORE PINTO
Orientadora

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por todo o suporte e paciência, em especial ao meu esposo, Daniel, e a minha irmã, Letícia, pela ajuda e poder compartilhar com vocês as experiências ao longo dessa jornada.

À minha orientadora, professora Dra. Fabiana Fiore e co-orientadora, Dra. Amanda Maria Dantas, por todo o apoio, paciência e contribuições na construção deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Ambiental do ICT/UNESP de São José dos Campos pela oportunidade.

Aos amigos Eduardo Toledo, Mirella Gama, Carol Massuci, Magda Hirsch e Arthur Bispo que contribuíram de forma significativa na construção desse projeto. E a todos os professores que contribuíram na validação dos mesmos.

E a todos que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a realização deste trabalho, o meu muito obrigada.

RESUMO

A tendência de urbanização e de rápido crescimento da população mundial estabelecem uma demanda de água potável cada vez maior. As Estações de Tratamento de Águas (ETAs) desempenham papel crucial no tratamento da água para consumo humano. No entanto, o processo resulta na geração contínua de resíduos, conhecidos como Lodos de Estação de Tratamento de Água (LETA), cuja composição varia conforme a qualidade da água bruta, os métodos e insumos de tratamento empregados. A gestão e o gerenciamento desses resíduos é um desafio ambiental em função do volume gerado, da recorrente e crescente geração, da disposição inadequada e do aterramento como rejeito em aterros sanitários. Diante deste cenário, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a secagem térmica e os aspectos e impactos da disposição de LETAs em solos. Para isso, mapeou-se e classificou-se os principais impactos ambientais da disposição de LETAs em solos e comparou-se as perspectivas de pesquisadores e profissionais do saneamento. Também foi avaliado o impacto da secagem térmica nas características físico-químicas e microbiológicas de lodos de estação de tratamento de água, por meio de estudo de caso exploratório em ETA localizada no estado de São Paulo. Além disso, avaliou-se os aspectos ambientais associados às disposições dos LETAs (seco termicamente, naturalmente e desaguado) no solo. Com isso, verificou-se que ainda há uma lacuna no conhecimento sobre os impactos da disposição dos LETAs entre pesquisadores e profissionais do saneamento e que a temática demanda a realização de estudos e ampla divulgação para garantir que medidas preventivas sejam adotadas nas ETAs. Foi observado também, que a secagem térmica propicia a inativação de microorganismos e que o produto dela resultante traz benefícios para as demais etapas do manejo deste resíduo. No entanto, a presença dos elementos: bário, cromo e mercúrio, nos extratos lixiviados, evidencia a necessidade de realização de ensaio complementar de toxicidade para a adequada classificação desses resíduos. E ao avaliar a disposição de LETAs em solo através de um aparato experimental, simulando diferentes condições, verificou-se que tanto as condições operacionais quanto o tipo de secagem de lodo exercem influência significativa na concentração de metais dos percolados. Isso evidencia que as simulações foram capazes de representar as diferentes condições de disposição de LETAs em solos.

Palavras-chave: Lodo de ETA, Secagem Térmica, Disposição de LETAs.

ABSTRACT

The trend of urbanization and rapid population growth worldwide establish an increasingly higher demand for potable water. Water Treatment Plants (WTPs) play a crucial role in treating water for human consumption. However, the process results in the continuous generation of waste, known as Water Treatment Plant Sludge (WTPS), whose composition varies according to the quality of the raw water, the methods, and treatment inputs employed. Managing and handling these wastes is an environmental challenge due to the volume generated, the recurring and growing generation, improper disposal, and landfilling as waste in landfills. In this scenario, this study aims to evaluate thermal drying and the aspects and impacts of the disposal of WTPS in soils. For this purpose, the main environmental impacts of WTPS disposal in soils were mapped and classified, and the perspectives of researchers and sanitation professionals were compared. The impact of thermal drying on the physicochemical and microbiological characteristics of water treatment plant sludge was also evaluated through an exploratory case study at a WTP located in the state of São Paulo. Furthermore, the environmental aspects associated with the disposal of WTPS (thermally dried, naturally, and dehydrated) in soil were evaluated. It was found that there is still a gap in knowledge about the impacts of WTPS disposal among researchers and sanitation professionals and that the topic requires the conduct of studies and widespread dissemination to ensure that preventive measures are adopted in WTPs. It was also observed that thermal drying facilitates the inactivation of microorganisms and that the resulting product brings benefits to the other stages of managing this waste. However, the presence of the elements barium, chromium, and mercury in leachate extracts highlights the need for additional toxicity testing for the proper classification of these wastes. When evaluating the disposal of WTPS in the soil through an experimental apparatus, simulating different conditions, it was found that both operational conditions and the type of sludge drying significantly influence the concentration of metals in leachates. This shows that the simulations were able to represent the different conditions of WTPS disposal in soils.

Keywords: WTP Sludge, Thermal Drying, WTPS Disposal.

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1: PRIMEIRO ARTIGO

| | |
|--|----|
| Figura 1: Etapas metodológicas executadas para a realização da pesquisa..... | 15 |
| Figura 2: Potenciais impactos positivos e negativos identificados na aplicação de LETAs em solos..... | 17 |
| Figura 3: Potenciais impactos positivos do uso benéfico da LETAs em solos..... | 19 |
| Figura 4: Gráficos do método AHP para definição de prioridades de acordo com percepções | 20 |
| Figura 5: Potenciais impactos negativos do uso benéfico da LETAs em solos..... | 22 |
| Figura 6: Gráficos do método AHP para definição de prioridades de acordo com percepções..... | 23 |
| Figura 7: Potenciais impactos da disposição de LETAs como rejeitos em aterros sanitários..... | 24 |
| Figura 8: Gráficos do método AHP para definição de prioridades de acordo com percepções | 25 |

CAPÍTULO 2: SEGUNDO ARTIGO

| | |
|--|----|
| Figura 1: Fluxograma geral do sistema de adensamento, desidratação e secagem de lodo..... | 36 |
| Figura 2: Fluxograma do sistema de secagem térmica..... | 37 |

CAPÍTULO 3: TERCEIRO ARTIGO

| | |
|---|----|
| Figura 1: Fluxograma da pesquisa | 54 |
| Figura 2: Aparato Experimental..... | 55 |
| Figura 3: Etapa Experimental | 57 |
| Figura 4a: Concentração dos elementos Alumínio, Bário, Cádmio, Cobalto, Cromo, Manganês, Níquel e Chumbo | 64 |
| Figura 4b: Concentração dos elementos Cobre, Zinco, Ferro, Magnésio e Potássio nos líquidos percolados..... | 65 |
| Figura 5a: Boxplot de percolação da concentração dos parâmetros: Alumínio, Bário, Cádmio, Cobalto, Cromo, Manganês, Níquel e Chumbo..... | 66 |
| Figura 5b: Boxplot de percolação da concentração dos parâmetros: Cobre, Zinco, Ferro, Magnésio e Potássio..... | 67 |

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO 2: SEGUNDO ARTIGO

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Métodos analíticos para caracterização físico-química..... | 38 |
| Tabela 2: Métodos analíticos para caracterização microbiológica | 39 |
| Tabela 3: Caracterização da massa bruta | 39 |
| Tabela 4: Caracterização microbiológica..... | 41 |
| Tabela 5: Elementos Químicos presentes em extratos lixiviados | 42 |
| Tabela 6: Elementos químicos presentes em extratos solubilizados..... | 44 |

CAPÍTULO 3: TERCEIRO ARTIGO

| | |
|---|----|
| Tabela1: Parâmetros e métodos analíticos utilizados para a caracterização das amostras dos lodos e solo. | 58 |
| Tabela2: Parâmetros, fontes e métodos de análise utilizados para análises das amostras de percolados..... | 58 |
| Tabela3: Resultados de condutividade e pH da água de acordo com o cronograma de alimentação..... | 61 |
| Tabela4: Resultados analíticos dos LETAs e solo utilizados no preenchimento dos reatores. | 61 |
| Tabela5: Resultados do teste de Shapiro-Wilk por parâmetro durante os meses de análise por reator..... | 72 |
| Tabela6: Resultado do teste de <i>Kruskal-Wallis</i> em termos do valor- <i>p</i> | 73 |
| Tabela7: Matriz de interação para diferenças estatisticamente significativas entre os reatores | 75 |
| Tabela8: Matriz de interação diferenças estatisticamente significativas entre os tipos de secagem de lodo e condições experimentais..... | 76 |
| Tabela9: Comparação mediana da concentração dos metais com normativas nacionais..... | 79 |
| Tabela10: Parâmetros físico-químicos dos percolados por reatores | 81 |
| Tabela11: Concentrações de metais nos percolados por reatores. | 84 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AS – Aterro Sanitário

ETA – Estação de Tratamento de Água

LETA – Lodo de Estação de Tratamento de Água

LD – Lodo Desaguado

LSN – Lodo Seco Naturalmente

LSS – Lodo Seco em Secador

OG – Obras Geotécnicas

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

RSU – Resíduo Sólido Urbano

SUMÁRIO

| | |
|---|------------|
| Resumo | i |
| Abstract | ii |
| Índice de Figuras | iii |
| Índice de Tabelas | iv |
| Lista de Siglas | V |
| 1. Introdução | 07 |
| 2. Objetivos..... | 09 |
| 2.1 Objetivo Principal..... | 09 |
| 2.1 Objetivos Específicos | 09 |
| 3. Capítulo 1: Primeiro Artigo | 10 |
| 4. Capítulo 2: Segundo Artigo | 30 |
| 5. Capítulo 3: Terceiro Artigo | 49 |
| 6. Considerações Finais..... | 89 |
| 7. Referências Finais | 90 |

1. INTRODUÇÃO

A tendência de urbanização e de rápido crescimento da população mundial estabelecem uma crescente demanda por água potável. Em vista disso, ocorre a excessiva exploração das fontes de água bruta e se demanda o desenvolvimento de sistemas de tratamento e de distribuição mais eficientes (AHMAD *et al.*, 2016). Dessa forma, a preocupação com a sustentabilidade ambiental no meio urbano tem aumentado, especificamente relacionada à disponibilidade e usos das águas (MORERA *et al.*, 2016).

O ciclo urbano da água inclui a retirada de água de recursos naturais, o tratamento para satisfazer aos padrões de qualidade e a distribuição do recurso para o consumo. Dentre os principais usos urbanos da água estão: o abastecimento domiciliar, a disponibilização de águas para as atividades recreativas, limpeza e irrigação de áreas urbanas e para os processos industriais (HIDALGO *et al.*, 2017).

A qualidade da água potável é um dos fatores que afetam a saúde humana. No entanto, a qualidade da água potável ainda vivenciada em muitos países, especialmente aqueles em desenvolvimento, induzem à proliferação de muitas doenças devido à má qualidade (P. LI & WU, 2019). A missão básica das estações de tratamento de água é fornecer água potável que satisfaça aos requisitos de qualidade estabelecidos pela legislação do território e que garantam a saúde pública. Além desse objetivo primordial, as concessionárias também precisam operar os sistemas de forma rentável e sustentável (KUČERA *et al.*, 2018).

Segundo Godoy *et al.*, (2019), as estações de tratamento de água estão presentes em 85% dos 5.570 municípios brasileiros, o que significa aproximadamente 7.500 unidades distribuídas em 8.516 milhões de Km². No entanto, o processo de tratamento físico-químico das águas brutas, em geral captadas superficialmente no país, produz uma quantidade significativa de lodos de ETA (LETAs). Esses resíduos são gerados principalmente nas operações unitárias dos decantadores e filtros (SANTOS, 2016). Os LETAs possuem características físico-químicas que variam com a natureza da água captada, os processos unitários das ETAs e os produtos químicos aplicados no tratamento (GODOY *et al.*, 2019).

Em função da sazonalidade e heterogeneidade dos LETAs, se faz necessário a caracterização desse resíduo para cada estação de tratamento de água para fins de reciclagem e reutilização (NAZIR *et al.*, 2020). Na origem, em geral, os LETAs possuem mais de 97% de água, apresentam compostos químicos do processo de tratamento e sólidos em suspensão, principalmente partículas de solo (areia, silte e argila), mas podem também apresentar matéria orgânica, algas, bactérias e vírus (BOSCOV *et al.*, 2021).

Na maioria dos países em desenvolvimento, o lodo gerado nas estações de tratamento de água ainda é lançado *in natura* nos corpos d'água, uma prática não permitida em países com regulamentações ambientais sólidas, pois essa atividade pode causar assoreamento e deterioração da qualidade da água (BOSCOV *et al.*, 2021). Dentre as melhores práticas de destinação atualmente vigente está a disposição final em aterros sanitários como rejeitos. No entanto, considerados os aspectos ambientais associados

à elevada quantidade de lodos produzidos nas ETAs e a escassez de áreas para sua disposição adequada se faz necessária a promoção da valorização desses resíduos de forma que esses possam ser convertidos em material com capacidade para ser incorporado à cadeia produtiva (ARGUDO-GARCÍA *et al.*, 2017).

Diversos estudos apontam para a viabilidade técnica do uso benéfico de LETAs em diversos processos produtivos. A substituição de recursos naturais, que deixam de ser explorados, por LETAs permite a incorporação dos princípios da economia circular a essa atividade (COSENZA *et al.*, 2020). Embora ainda escassa, as pesquisas sobre as propriedades e aplicações geotécnicas dos LETAs tem aumentado nos últimos anos. Dentre os usos benéficos avaliados no Brasil estão: a incorporação de LETAs em diferentes solos para a produção de base e sub-base de pavimentos (FIORE *et al.*, 2022) e para a cobertura de aterros (BOSCOV *et al.*, 2021).

A despeito da viabilidade técnica do uso benéfico desses resíduos, se faz necessária a avaliação dos impactos ambientais decorrentes dessas aplicações a partir de resultados experimentais (BOSCOV *et al.*, 2021), assim como dos impactos das melhores práticas atualmente observadas. É nesse cenário que a pesquisa foi conduzida, visando corroborar com a ampliação do conhecimento científico sobre a temática. Gerando assim, informações qualificadas que propiciem o estabelecimento de diretrizes relacionadas ao uso benéfico do material e ao controle dos aspectos ambientais de sua disposição final. Seus resultados foram apresentados em três minutas de artigos científicos que objetivaram (1) identificar os potenciais impactos ambientais da disposição de LETAs em solos a partir da percepção de atores atuantes na área de saneamento; (2) Avaliar os efeitos da secagem térmica nas características dos LETAs, por meio de estudo de caso em unidade operante no estado de São Paulo; (3) Determinar os potenciais impactos decorrentes de destinações de LETAs em solos, por meio de simulações de condições ambientais ocorrentes no estado de São Paulo.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Avaliar a secagem térmica e os aspectos e impactos da disposição de LETAs em solos.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

O primeiro artigo possui o seguinte objetivo:

- Mapear e classificar os principais impactos ambientais da disposição de LETAs em solos e comparar as perspectivas de pesquisadores e profissionais do saneamento.

O segundo artigo possui o seguinte objetivo:

- Avaliar o impacto da secagem térmica nas características físico-químicas e microbiológicas de lodos de estação de tratamento de água, por meio de estudo de caso exploratório em ETA localizada no estado de São Paulo, Brasil.

O terceiro artigo possui o seguinte objetivo:

- Avaliar os aspectos ambientais associados às disposições dos LETAs (seco termicamente, naturalmente e desaguado) no solo.

3. CAPÍTULO 1: POTENCIAIS IMPACTOS AMBIENTAIS DA DISPOSIÇÃO DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS EM SOLOS

Este artigo foi submetido para publicação na Revista DAE. O trabalho foi submetido em Abril/2024.

POTENCIAIS IMPACTOS AMBIENTAIS DA DISPOSIÇÃO DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS EM SOLOS

RESUMO

A adequação da água para abastecimento humano, ocorre nas estações de tratamento de águas e acarreta em geração de resíduos denominados lodos de ETAs (LETAs). No Brasil existem requisitos legais que determinam a destinação ambientalmente correta dos LETAs, todavia, grande parte desses resíduos ainda é lançada in natura. Neste contexto, o objetivo da pesquisa foi identificar os potenciais impactos ambientais da disposição dos LETAs em solos. Para identificação da percepção dos impactos ambientais relacionados à disposição dos LETAs, foi realizada uma pesquisa com especialistas. O questionário foi dividido em duas seções: uma relacionada ao uso benéfico dos LETAs em obras de solo e outra sobre a disposição final em aterros. A aplicação de uma análise estatística, com o uso do ChartExpo e da calculadora do método AHP, contribuiu para a quantificação e priorização dos impactos ambientais, destacando aqueles percebidos como mais relevantes por cada grupo. Profissionais do saneamento destacaram predominantemente os impactos positivos associados ao uso de LETAs, como a recuperação de solos degradados e o fornecimento de matéria orgânica. Suas prioridades também incluíram aspectos econômicos, como a geração de trabalho e renda. Em contraste, os pesquisadores avaliaram mais potenciais impactos negativos, como fitotoxicidade e a presença de microorganismos patogênicos, além de questões ambientais, como alterações em habitats e perda de biodiversidade. Assim, pode-se concluir que ainda há uma lacuna no conhecimento sobre os impactos da disposição dos LETAs e que a temática demanda a realização de estudos e ampla divulgação para garantir que medidas preventivas sejam adotadas nas ETAs.

Palavras-chave: Disposição de LETAs, Impactos ambientais, Impactos do lodo, Resíduo sólido.

ABSTRACT

The suitability of water for human consumption occurs in water treatment plant, leading to the generation of residues known as Water Treatment Plant Sludges (WTPS). In Brazil, legal requirements are determining the environmentally correct disposal of WTPS; however, a significant portion of these residues is still disposed of in nature. In this context, the research aimed to identify the potential environmental impacts of WTPS disposal in soils. To understand the perception of environmental impacts related to WTPS disposal, a survey was conducted with experts. The questionnaire was divided into two sections: one related to the beneficial use of WTPS in soil works and another on the final disposal in landfills. The application of statistical analysis, using ChartExpo and the Analytic Hierarchy

Process (AHP) method calculator, contributed to the quantification and prioritization of environmental impacts, highlighting those perceived as most relevant by each group. Sanitation professionals predominantly emphasized the positive impacts associated with WTPS use, such as soil recovery and the supply of organic matter. Their priorities also included economic aspects, such as job creation and income. In contrast, researchers assessed more potential negative impacts, such as phytotoxicity and the presence of pathogenic microorganisms, along with environmental issues such as habitat alterations and biodiversity loss. Thus, it can be concluded that there is still a knowledge gap regarding the impacts of WTPS disposal, and the subject requires further studies and widespread dissemination to ensure that preventive measures are adopted in water treatment plant.

Keywords: WTPS disposal, Environmental impacts, Sludge impacts, Solid waste.

1. INTRODUÇÃO

O acesso humano à água em quantidade e qualidade para garantir a saúde e o gozo da vida é um direito universal ainda não assegurado e, por isso, ainda relacionado como um dos objetivos de desenvolvimento sustentável (SETTI *et al.*, 2001; UNDP – SIWI, 2021). A escassez econômica de água ainda vigente, principalmente nos países não desenvolvidos, é dependente da disponibilidade hídrica dos territórios e da infraestrutura para acesso ao recurso (IWMI, 2007).

Dentre as fontes utilizadas para o abastecimento humano estão as águas superficiais que são de fácil captação, mas que contêm poluentes decorrentes dos usos e ocupação da bacia hidrográfica de contribuição (FIORE *et al.*, 2020). Consideradas as características do ciclo hidrológico, é mister afirmar que as águas superficiais são as principais receptoras de poluentes, uma vez que: os poluentes lançados na superfície são carreados para os pontos de menor declividade onde ocorrem as águas superficiais; os poluentes emitidos na atmosfera alcançam os corpos d'água diretamente ou por meio da deposição úmida e dos escoamentos superficiais; os contaminantes dispostos no subsolo percolam e alcançam as águas subterrâneas e são elas que garantem a perenidade dos fluxos de águas na superfície.

A remoção de carga poluidora de águas superficiais para adequação ao consumo humano ocorre nas estações de tratamento de águas e, em geral, acarreta geração sazonal e heterogênea de resíduos denominados lodos de ETAs. Esses resíduos, para além dos contaminantes presentes nas águas brutas, também contém os elementos presentes nos insumos da potabilização das águas e do tratamento prévio dos LETAs que é realizado na unidade geradora tais como: os coagulantes que garantem os processos de floculação e decantação e os polímeros utilizados na etapa de desaguamento dos LETAs (FIORE *et al.*, 2022). Os LETAs são compostos por elementos orgânicos e inorgânicos, principalmente Fe, Al, Mn e Cu, mas também podem conter poluentes persistentes e microrganismos patogênicos (ACKAH *et*

al., 2018; CHEN *et al.*, 2019; ULLMANN *et al.*, 2019).

A geração diária de LETAs no Brasil é da ordem de 260 a 800 mil m³ e decorre da operação de estações que adequa a qualidade das águas captadas com vistas ao abastecimento público das áreas urbanas. No país, esses lodos são classificados como resíduos reversos não perigosos, provenientes dos serviços públicos de saneamento básico, com responsabilidade de manejo atribuída ao agente gerador. No território existem requisitos legais que determinam a obrigatoriedade da destinação ambientalmente correta, no entanto, grande parte desses resíduos ainda é lançada *in natura* nos cursos d'água, acarretando significativo impacto ambiental (BRASIL, 2010; BRASIL, 2020).

Na atualidade, a prática regularmente aceita no Brasil para a destinação dos LETAs é a disposição final que em geral ocorre nos aterros sanitários, em conjunto com os resíduos sólidos urbanos. Estima-se que os custos do manejo adequado desses lodos representem de 20 a 60% dos custos operacionais das ETAs. Considerada a disposição inadequada vigente e os altos custos de aterramento, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas no país com o objetivo de potencializar a mudança do atual cenário de degradação. Essas pesquisas evidenciam a viabilidade técnica de uso benéfico desses resíduos para a construção civil em obras de solos ou para a fabricação de produtos cerâmicos e em concreto (BOSCOV *et al.*, 2021; FIORE *et al.*, 2022; SANTOS E CAMPOS, 2018). No entanto, segundo Urban, Lima e Morita (2019), as pesquisas sobre essa destinação ainda são realizadas em escalas laboratoriais e sem estudo dos potenciais impactos ambientais e econômicos.

Os impactos ambientais da disposição de LETAs diretamente em solos, seja em aterros ou obras de terra, ainda são pouco estudados. No entanto, a imobilização de fósforo em solos, a imobilização de metais e a recuperação de áreas degradadas são benefícios reportados pela aplicação de LETAs em solos alcalinos (KOOPMANS *et al.*, 2020; ARAB *et al.*, 2020; ACKAH *et al.*, 2018; HOWELLS *et al.*, 2018).

Alvarenga *et al.* (2018) fez uso do LETA para correção do solo afetado pelas atividades da mineração e concluiu que a presença de matéria orgânica nos LETAs os torna potenciais corretivos para remediação de solos degradados pela mineração, pois corrige a acidez e reduz a fração de metal extraível (adsorção de metais). Ainda segundo os autores, se aplicado juntamente com cal, o LETA permite a redução da ecotoxicidade do solo da mina. Os LETAs também podem ser utilizados como adsorventes e meio de cultivo nos solos, e mostrou estímulo à germinação e crescimento de sementes de trigo (ZHANG *et al.*, 2021).

O estudo de Benlalla *et al.* (2014) testou a calagem do lodo em diferentes concentrações, para aumento de seu valor agrônomo. A calagem permitiu a estabilização da matéria orgânica e o aumento do pH e viabilizou o aumento do nível de cálcio. Os resultados demonstraram que os LETAs da área de estudo apresentaram características agrônômicas adequadas para o espalhamento agrícola. O uso

sustentável do LETA para aplicações geotécnicas também vem apresentando alta aplicabilidade. Dohim *et al.* (2019) fez uso do LETA para desenvolvimento de geopolímeros livres de cimento comum. Boscov *et al.* (2021) estudou a aplicação do LETA, misturado com cal, solo ou pó de rocha para aplicações geotécnicas, analisando propriedades geotécnicas como permeabilidade, resistência ao cisalhamento, etc., e verificaram que algumas misturas têm viabilidade técnica para serem usadas como coberturas diárias e intermediárias de aterros de resíduos. Fiore *et al.* (2022) identificou o potencial técnico de substituição de solos naturais por LETAs, em até 50%, para a construção de base e sub-base de rodovias.

A despeito da viabilidade técnica de aplicações de lodo em solos, esses resíduos só contribuirão para a economia circular, caso também sejam comprovadas as viabilidades ambiental e econômica de produção e uso. Em vista disso, são demandados estudos químicos, bioquímicos e ecotoxicológicos, principalmente para as soluções que prevêm a aplicação em solos agrícolas, em que há contato direto com plantios. O teor orgânico do lodo, juntamente com as altas temperaturas do verão, resulta no aumento da atividade dos microrganismos do lodo, podendo causar poluição biológica (RANKOVIC *et al.*, 2020). Para o controle das comunidades biológicas, deve-se realizar o controle dos nutrientes e ferro na água bruta (XU *et al.*, 2018). O uso de diferentes tipos de radiação ionizante na inativação de microrganismos em LETA também vem sendo estudado. De acordo com Liu *et al.*, (2018), a melhor gestão de resíduos de tratamento de água potável na remediação ambiental deve ser baseada na compreensão abrangente da eficácia e do risco dos LETAs.

No Brasil, inexistem instrumentos legais específicos que abordem os requisitos de caracterização que potencializam a aplicação de LETAs. No entanto, em 2022, o estado do Rio Grande do Sul publicou regulamentação sobre a temática, definindo critérios e procedimentos para o uso de LETAs e seus produtos derivados em solos desse Estado. A resolução considera que o uso dos LETAs em solos é uma alternativa que apresenta vantagens econômicas e ambientais quando comparado a outras práticas de destinação final (CONSEMA, 2022). É no contexto de identificação de múltiplas aplicabilidades para os LETAs em solos e da precariedade de discussões e regulamentações brasileiras referentes à temática que essa pesquisa foi conduzida, com o objetivo de mapear e classificar os principais impactos ambientais da disposição de LETAs em solos e comparar as perspectivas de pesquisadores e profissionais do saneamento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta é uma pesquisa exploratória subsidiada por dados quanti-qualitativos para a realização de classificações comparativas (LAKATOS, 2021). Para sua realização foram executadas as etapas

apresentadas no fluxograma da Figura 1.

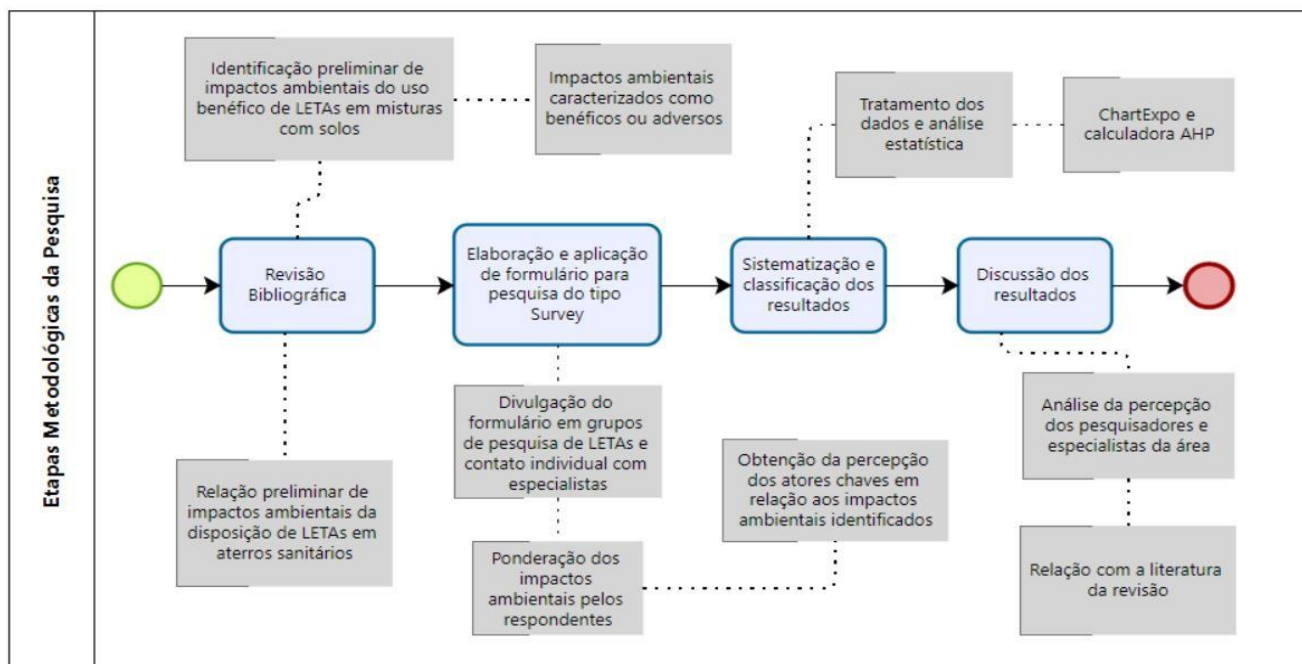


Figura 1 - Etapas metodológicas executadas para a realização da pesquisa.

Para a identificação preliminar de potenciais impactos ambientais do uso benéfico de lodos de ETAs em misturas com solos, foi realizada revisão da literatura nos bancos de dados *Scopus* e *Scielo* para obtenção de estudos de casos sobre a temática, nos últimos 7 anos. Para tal, foram utilizadas as palavras chaves: lodo de ETA, tratamento de água, lodo e viabilidade técnica de uso de lodo. Somou-se a esse banco de dados publicações oriundas de dissertações, teses e livros vinculados às universidades públicas brasileiras. Após exclusão das sobreposições, foi realizada análise de relevância e convergência com a temática. Os trabalhos selecionados foram sistematizados e deles foram extraídos os usos benéficos referidos pelos autores e os impactos ambientais identificados. Os potenciais impactos ambientais foram categorizados como benéficos ou adversos. A relação preliminar de potenciais impactos ambientais da disposição dos LETAs em aterros foi subsidiada pelo Termo de Referência para licenciamento de aterro sanitário da CETESB (CETESB, 2019).

Para identificação da percepção dos atores sociais em relação aos potenciais impactos ambientais relacionados à deposição de LETA em solo, foi realizada uma pesquisa do tipo *Survey* (GROVES *et al.*, 2009), com especialistas da área de saneamento, considerados os requisitos necessários ao levantamento de informações qualitativas sugeridos por Yin (2016). Para tal foi utilizado questionário estruturado, aplicado em plataforma *online* – *Forms* (Microsoft), onde os representantes do público-alvo da pesquisa foram convidados a ponderar os potenciais impactos ambientais listados e a descrever potenciais impactos adicionais, caso entendessem faltantes.

O questionário foi dividido em duas seções: uma relacionada ao uso benéfico de LETAs em obras de solo (impactos positivos e negativos) e outra da disposição final de LETAs em aterros para resíduos de classe 1 ou 2, subdividida em meio biofísico e antrópico. Para a ponderação, foi utilizada uma escala de 0 a 5, sendo que 0 foi atribuído ao não reconhecimento do impacto e 5 ao impacto de maior importância. A pesquisa foi realizada no primeiro semestre de 2022. Os resultados da *Survey* foram sistematizados e classificados em função da categoria do respondente, sendo os impactos avaliados entre 4 e 5 considerados como os reconhecidos pelos atores sociais. Esses potenciais impactos foram discutidos a partir do referencial bibliográfico e do arcabouço legal vigente no Brasil.

Para o tratamento dos dados obtidos através da pesquisa, foi realizada análise estatística e sistematização dos dados, com o uso do ChartExpo e da calculadora *Analytic Hierarchy Process* (AHP). O ChartExpo é uma ferramenta que utiliza a escala Linkert e que permite a visualização de como os entrevistados escolhem os níveis de concordância e discordância. A ferramenta possibilita a identificação de opiniões, atitudes e sentimentos de pessoas sobre um determinado produto ou serviço específico (COHEN, 2007). A calculadora AHP é um método de multicritério, que se baseia no método newtoniano e cartesiano de pensar e busca tratar a complexidade com a decomposição e divisão do problema em fatores. Esses fatores podem ainda ser decompostos em novos fatores até ao nível mais baixo, claros e dimensionáveis e estabelecer relações que podem ser sintetizadas. Este método é dividido em três etapas do pensamento analítico: construção de hierarquias; definição de prioridades e consistência lógica (MARINS *et al.*, 2009).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos trabalhos selecionados, por meio da revisão sistemática, os usos de LETAs em solos foram categorizados em dez classes, a saber: agente de adsorção de cátions em solos contaminados, condicionador para latossolos, condicionador para solos arenosos, cultivo de plantas do cerrado, absorção de fósforo, fixação de fósforo, aplicação em áreas mineradas, lodo com cianobactéria, constituição de geopolímeros e aplicações diversas. Para cada um desses usos foram identificados os potenciais impactos ambientais da aplicação, classificados como positivos e negativos em função das informações disponibilizada pelos autores. A Figura 2 apresenta os impactos positivos e negativos encontrados na revisão, de acordo com os 10 usos encontrados para aplicação de lodo de ETA em solos.

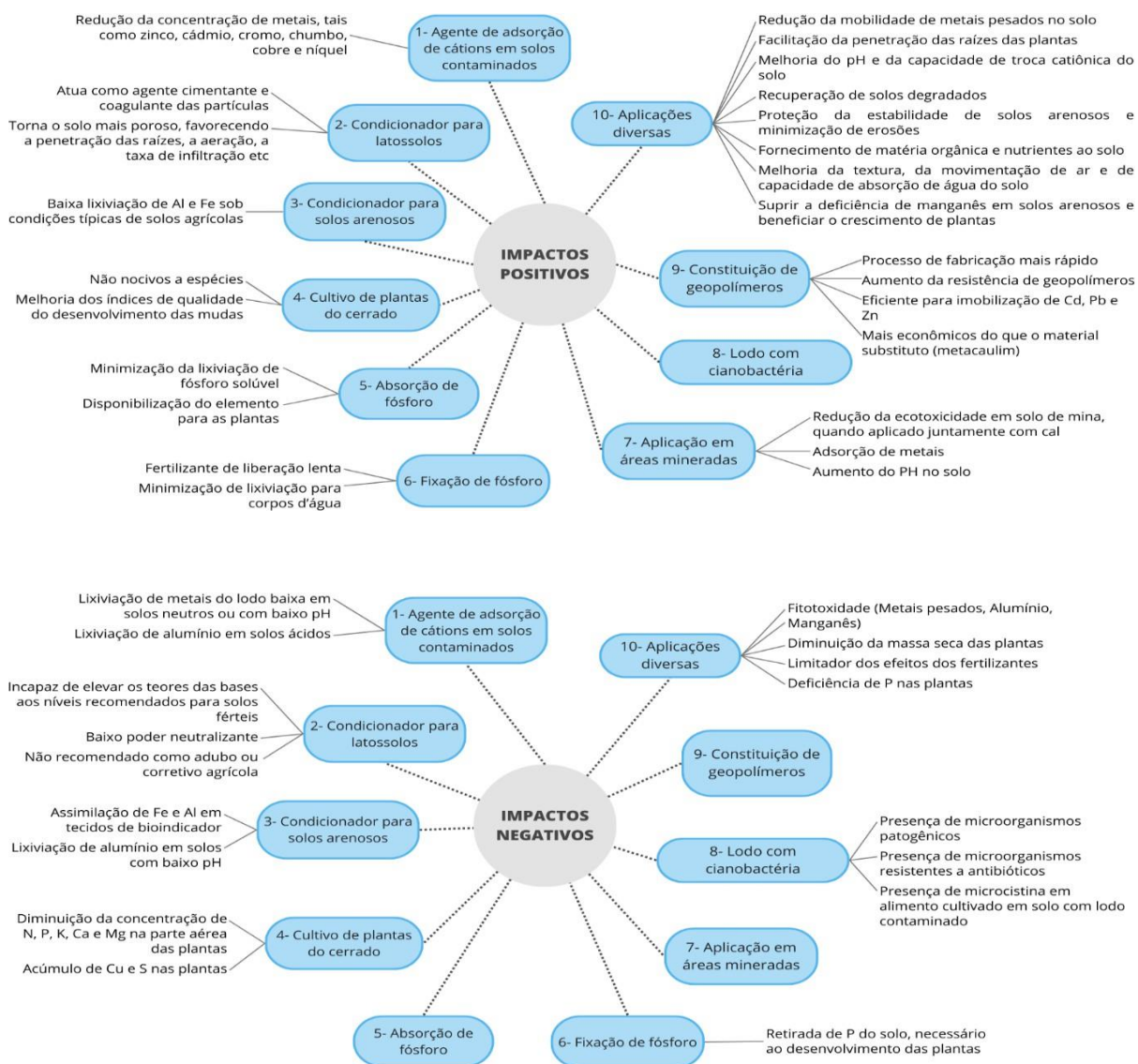


Figura 2 - Potenciais impactos positivos e negativos identificados na aplicação de LETAs em solos.

Fonte: Mahdy, Elkhatib e Fathi (2012); Oliveira, *et. al.* (2015); Howells, *et. al.* (2018); Figueiredo Neto (2011); Ramalho (2015); Ippolito (2015); Alvarenga, *et. al.* (2018); Ai, Lee and Lee (2020); Ji, Su and Pei (2020); Zhao, *et. al.* (2018).

Conforme mostrado na Figura 2, em alguns estudos os autores não reportaram impactos positivos e negativos. Exemplo disso pode ser observado para o uso 8 (aplicação do lodo com cianobactérias) cujos autores não identificaram os impactos positivos e para os usos 7 e 9 (aplicação em áreas mineradas e constituição de geopolímeros, respectivamente) onde os autores não reportam os potenciais impactos negativos. Cabe destacar que nenhum dos estudos relaciona todos os potenciais impactos da interação entre LETA e solo. Infere-se que isso esteja associado à complexidade da identificação dos impactos diretos e de suas interações nos meios biofísicos e socioeconômicos. Esse

achado corrobora com o disposto por Urban, Lima e Morita (2019), que abordam a incipiência de estudos voltados ao entendimento dos potenciais impactos ambientais relacionados aos usos benéficos de LETAs.

Por meio da *Survey*, obteve-se 22 avaliações dos impactos ambientais da aplicação de LETAs em solos. Dessas, 64% advieram de profissionais da área de Saneamento, que foi equivalente a 14 respostas englobando técnicos de saneamento, engenheiros de campo (ambiental, civil, químico e etc) e profissionais de gerenciamento operacional. As avaliações realizadas por pesquisadores universitários da área de Saneamento Ambiental, Geotecnia e Engenharia de Transportes, representaram 32%, ou seja, 7 respostas. As demais avaliações corresponderam a 4% representando outros profissionais que trabalham com o manejo de LETAs.

Dentre os respondentes estão informantes-chave brasileiros do estado de São Paulo, Minas Gerais, Ceará e também de Portugal. Os resultados quantitativos, referentes às percepções dos atores sociais participantes desta pesquisa estão apresentados nas Figuras 3, 4 e 5, de forma segregada para os profissionais do saneamento atuantes diretamente em ETAs e os pesquisadores da área. Além da quantificação dos resultados da pesquisa, aplicou-se o método AHP (Figuras 4, 6 e 8.), que é o método mais utilizado e conhecido no apoio à tomada de decisão na resolução de questões com múltiplos critérios. Dessa forma, foi possível calcular e definir as prioridades dos impactos listados de acordo com as percepções.

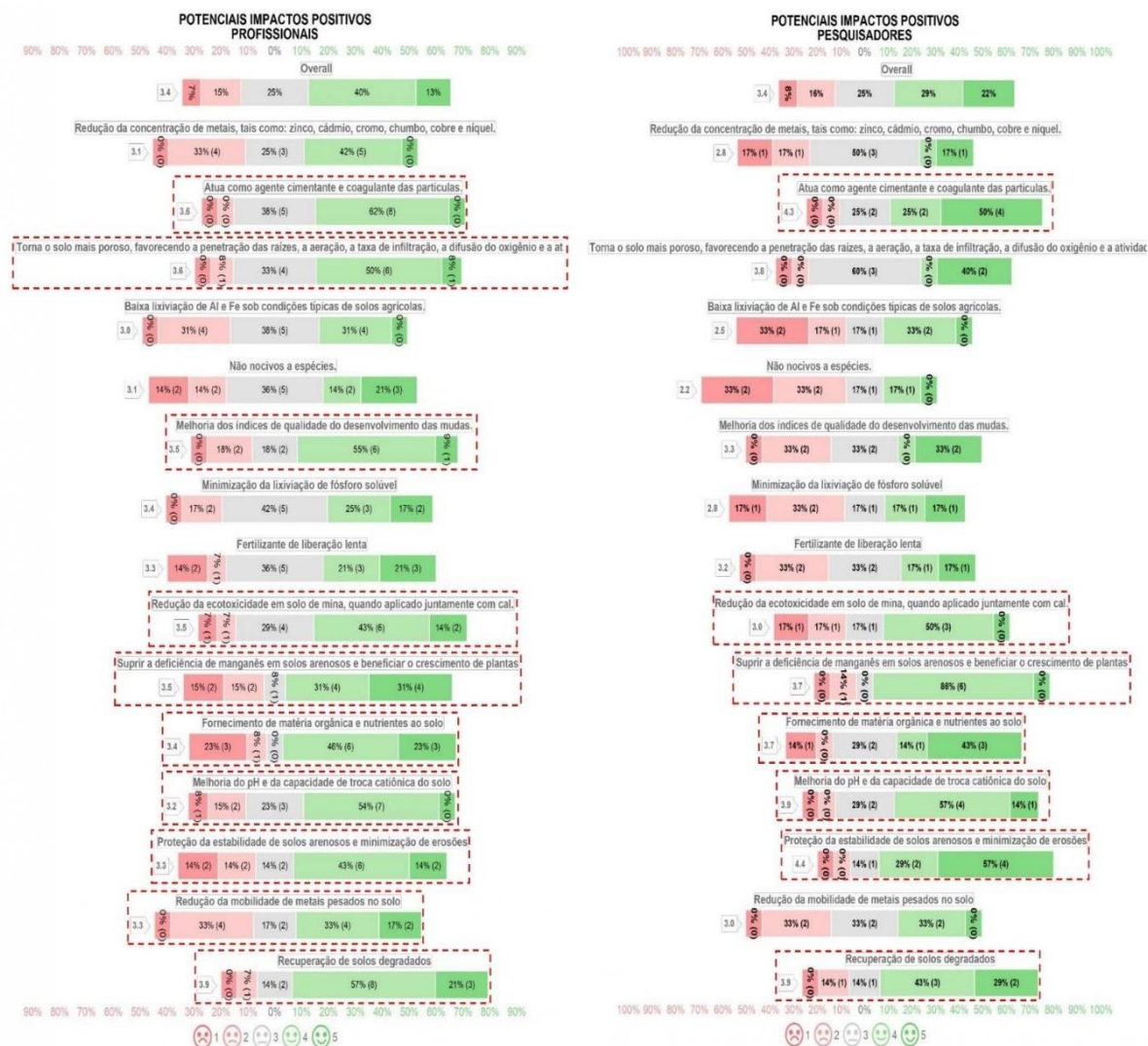


Figura 3 - Potenciais impactos positivos do uso benéfico da LETAs em solos.

Conforme mostrado na Figura 3, os profissionais da área de saneamento avaliaram 10 impactos positivos como os mais relevantes, enquanto que os pesquisadores consideraram somente 7. Esses foram impactos onde a maioria das avaliações estavam entre 4 e 5 (destacado na Figura 3 com tracejado em vermelho) de acordo com a escala apresentada no formulário, representando assim os mais importantes na percepção desses atores sociais.

A Figura 4 apresenta os gráficos gerados a partir do método AHP, onde realizou-se cálculos com base nas comparações da lista de potenciais impactos, a fim de identificar as prioridades nas avaliações de acordo com as percepções dos entrevistados. Foi possível identificar que os 3 impactos positivos mais relevantes na percepção dos profissionais da área do saneamento, em ordem decrescente, foram: recuperação de solos degradados; fornecimento de matéria orgânica e nutrientes ao solo e; melhoria dos índices de qualidade do desenvolvimento das mudas.

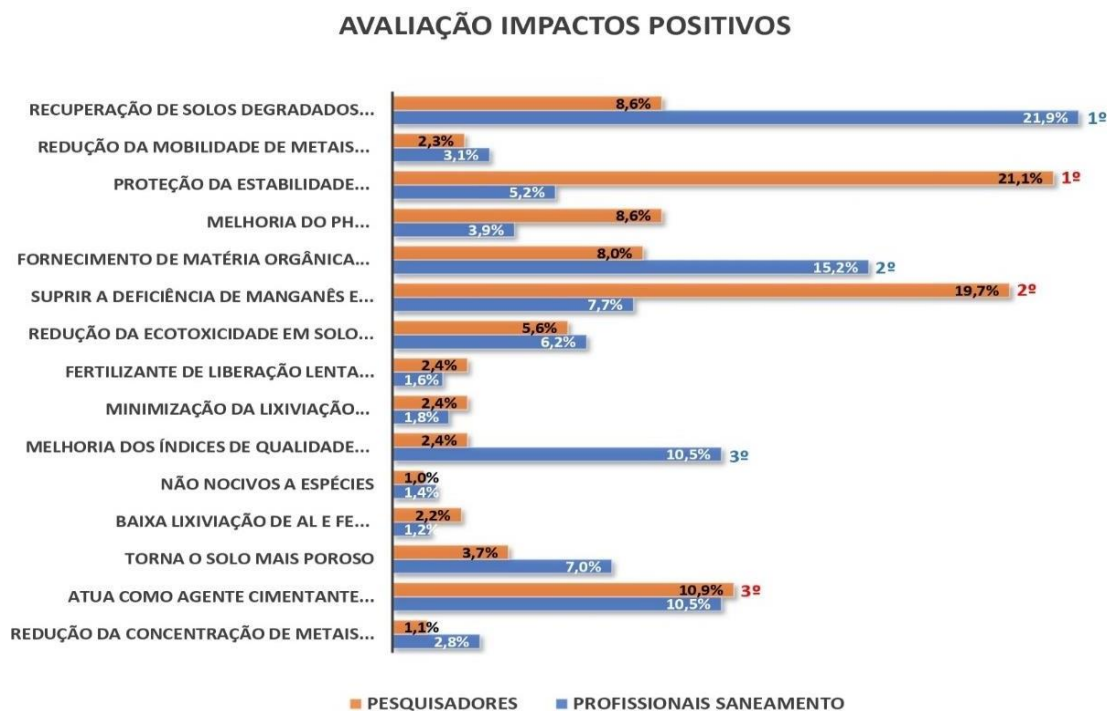


Figura 4 - Gráficos do método AHP para definição de prioridades de acordo com percepções.

Com base na avaliação dos profissionais da área, o impacto mais relevante (recuperação de solos degradados), de acordo com Cosme *et al.*, (2009), é justificado pois as características dos LETAs o tornam mais similar ao solo do que os lodos de esgotos. Neste caso, o nitrogênio e a matéria orgânica contida no LETA são, em geral, mais estáveis, menos reativos em menores concentrações. Além disso, alguns estudos indicam que doses controladas dos LETAs influenciam positivamente no crescimento das plantas e sua disposição pode ser realizada em áreas degradadas (WU *et al.*, 2019). Silva (2022), avaliou os efeitos da utilização de LETAs como componente do substrato utilizado na produção de mudas e como resultado, observou-se uma melhora no índice de qualidade das mudas, influenciado pelas doses de LETAs, onde a recomendação de adição é de até 20%.

Lucon *et al.*, (2019), em seu estudo sobre o uso agrícola de lodos de estação de tratamento de água, avaliou a capacidade de fornecimento de matéria orgânica, através da aplicação de LETAs em solo para o cultivo de milho. O autor verificou que as alterações para a matéria orgânica do solo devido a presença de LETA foram discretas, mas significativas, sendo que os tratamentos que receberam maior dose de lodo foram estatisticamente superiores aos tratamentos que não receberam o lodo. Todavia, de acordo com Franco (2019), uma vez que o lodo proveniente de ETAs não é tão rico em matéria orgânica, a sua mistura com outros resíduos, como o lodo de esgoto, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), poderia potencializar o seu uso na agricultura, já que o lodo de ETE possui maior quantidade de matéria orgânica e quantidades significativas de macro e micronutrientes.

Para os pesquisadores entrevistados por essa pesquisa, os potenciais impactos positivos mais

relevantes foram: proteção da estabilidade de solos arenosos e minimização de erosões; supreção da deficiência de manganês em solos arenosos e efeito benéfico para o crescimento de plantas e; atuação como agente cimentante e coagulante das partículas. De acordo com Montalvan, (2016), a resistência ao cisalhamento é uma das propriedades mais importantes dos solos, pois os parâmetros de resistência influenciam principalmente a estabilidade dos taludes (naturais e de aterros). Essas propriedades de resistência também são encontradas nos LETAs, possibilitando assim sua aplicação em obras geotécnicas. Essa informação corrobora para a avaliação dos pesquisadores, que indicaram como mais relevante o impacto positivo de proteção da estabilidade de solos arenosos e minimização de erosões.

Segundo Wasserman *et al.*, 2019, os LETAs normalmente possuem em sua composição uma concentração significativa de manganês, normalmente proveniente do próprio manancial. Dessa forma, a utilização dos lodos de ETAs para suprir a deficiência de manganês em solos arenosos, possui um potencial significativo visto que, o manganês é um micronutriente essencial para fotossíntese e é importante para reduzir nitrato em nitrito nas plantas (NEVES, 2019). A propriedade dos LETAs de atuação como agente cimentante foi avaliada por Oliveira *et al.* (2015), que verificou que a aplicação do lodo de ETA em solo proporcionou a redução de 20% do índice de saturação do solo por Al. Dessa forma, os autores afirmam que o LETA atua como agente cimentante e coagulante das partículas, tornando o solo mais poroso, o que favorece a penetração das raízes, a aeração, a taxa de infiltração, a difusão do oxigênio, a atividade biológica, melhorando assim a estrutura do solo e o desenvolvimento das plantas.

Na Figura 5 (avaliação dos potenciais impactos negativos), os profissionais da área de saneamento reconheceram 6 impactos negativos associados à deposição de LETAs em solos como os mais relevantes, enquanto que os pesquisadores consideraram 8. Esses foram impactos onde a maioria das avaliações estavam entre 4 e 5, de acordo com a escala apresentada no formulário, representando assim os mais importantes na percepção desses atores sociais.

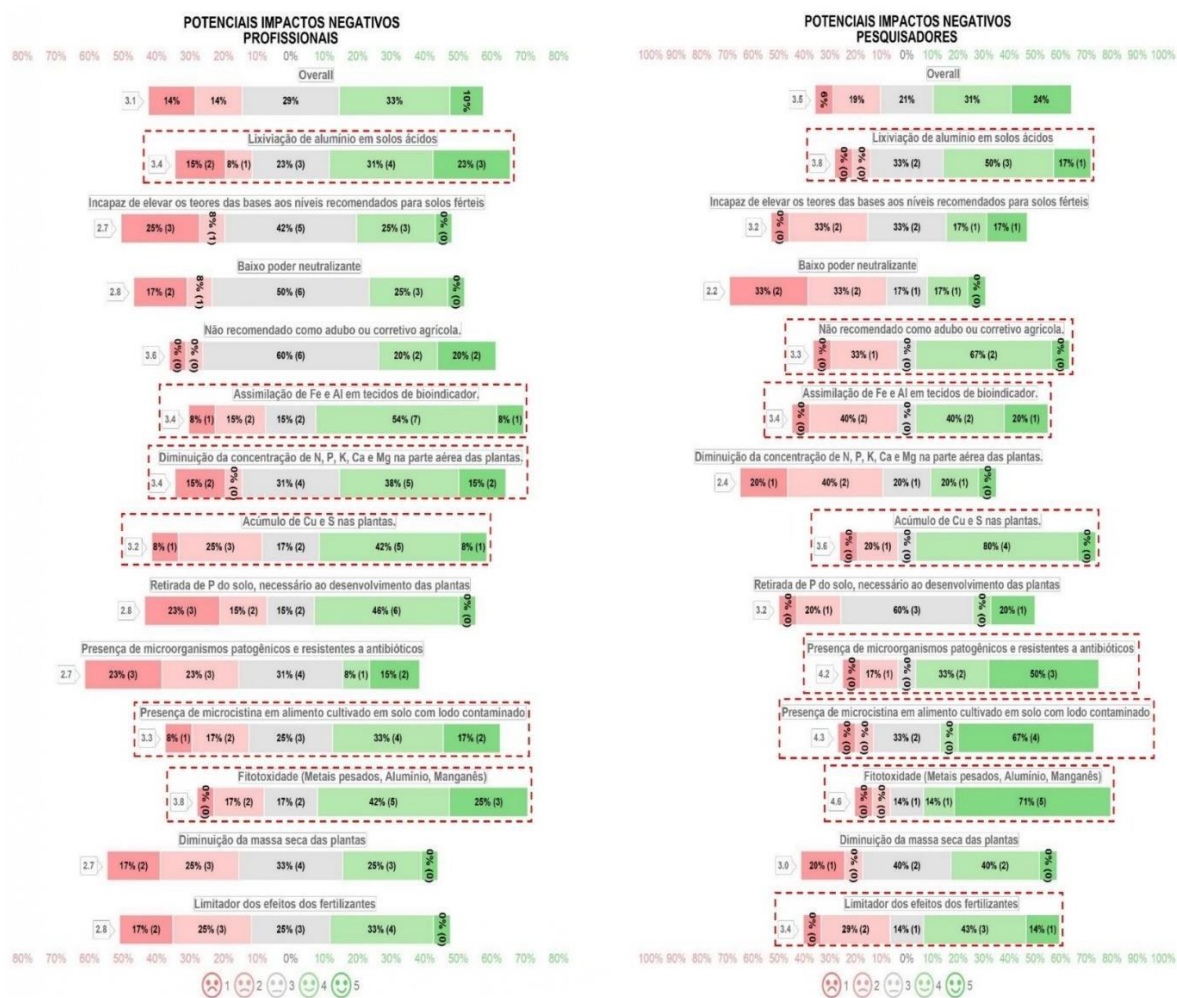


Figura 5 - Potenciais impactos negativos do uso benéfico da LETAs em solos.

Já na Figura 6, está apresentado os gráficos gerados a partir do método AHP, onde realizou-se cálculos com base nas comparações da lista de potenciais impactos. Dessa forma, foi possível identificar que os 3 impactos negativos mais relevantes na percepção dos profissionais da área do saneamento em ordem decrescente foram: fitotoxicidade (metais pesados, alumínio, manganês); assimilação de Fe e Al em tecidos de bioindicador e; lixiviação de alumínio em solos ácidos.

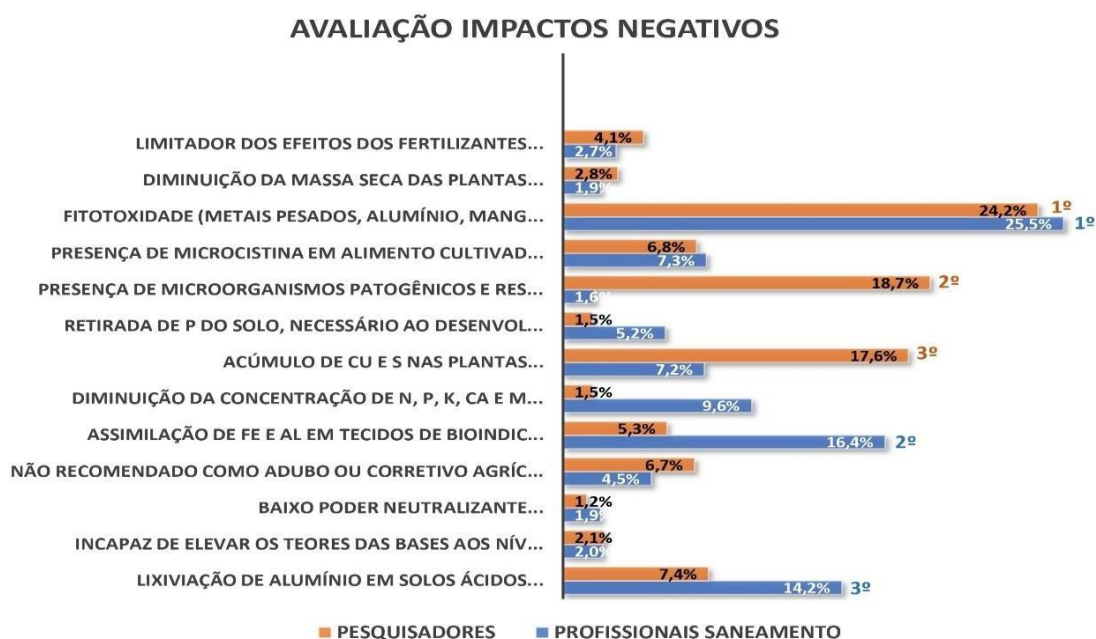


Figura 6. Gráficos do método AHP para definição de prioridades de acordo com percepções.

A fitotoxicidade percebida como principal impacto negativo da deposição de LETAs no solo, por pesquisadores e profissionais da área do saneamento entrevistados nessa pesquisa, condiz com o que foi reportado por Rural e Maria (2001). Segundo os autores, o impacto ambiental negativo decorrente da toxicidade do alumínio é fator limitante da produtividade de culturas em solos ácidos.

A priorização dos demais impactos negativos realizada pelos profissionais da área de saneamento, a saber: assimilação de Fe e Al em tecidos de bioindicadores e a lixiviação de alumínio em solos ácidos; reflete o conhecimento desses atores sociais a respeito da composição dos LETAs, que incorporam aos poluentes das águas brutas os dois principais coagulantes utilizados para a potabilização de águas brutas (Fe e Al). A presença majoritária desses elementos na composição dos LETAs foi reportada por Silva *et al.*, 2012; Fiore *et al.*, 2020; Lemos *et al.*, 2020.

Os pesquisadores também reconheceram como potenciais impactos negativos relevantes a presença de microorganismos patogênicos e resistentes a antibióticos e; o acúmulo de Cu e S nas plantas. A patogenicidade dos LETAs foi verificada por LEITE *et al.*, (2023) em lodos desaguados de alumínio e ferro. Destaca-se que em estudo realizado por Silva *et al.*, (2023), sobre a caracterização de LETAs desaguado e seco, foi observada a ausência de coliformes termotolerantes (fecais), *Escherichia coli*, ovos viáveis de helmintos e *Salmonella sp.* nesses lodos. Nessa pesquisa, os autores identificaram a presença de coliformes totais nas amostras de lodo desaguado e destacaram a ocorrência de redução significativa na concentração desse microorganismo após processo de tratamento térmico.

Em relação ao potencial acúmulo de Cu e S nas plantas, Silva (2005) relata que o uso do lodo de ETA como fertilizante pode ser viável porque contém determinados nutrientes às plantas como o próprio Fe e Ca, além de S, Mg, Cu, Mn. Porém, altas doses desses metais acumulados no solo podem vir a ser preocupantes, pois existe o risco de serem transferidos para as diferentes espécies de plantas

e, portanto, de serem capazes de entrar na cadeia trófica (RANGEL *et al.*, 2006).

A Figura 07 apresenta a percepção dos profissionais da área de saneamento e dos pesquisadores em relação à disposição dos LETAs em aterros de classe 1 ou 2. Foram reconhecidos 2 potenciais impactos como os mais relevantes pelos profissionais da área de saneamento, enquanto que os pesquisadores consideraram 10. Os impactos reconhecidos foram aqueles onde a maioria das avaliações estavam entre 4 e 5, de acordo com a escala apresentada no formulário, representando assim os mais importantes na percepção desses atores sociais.

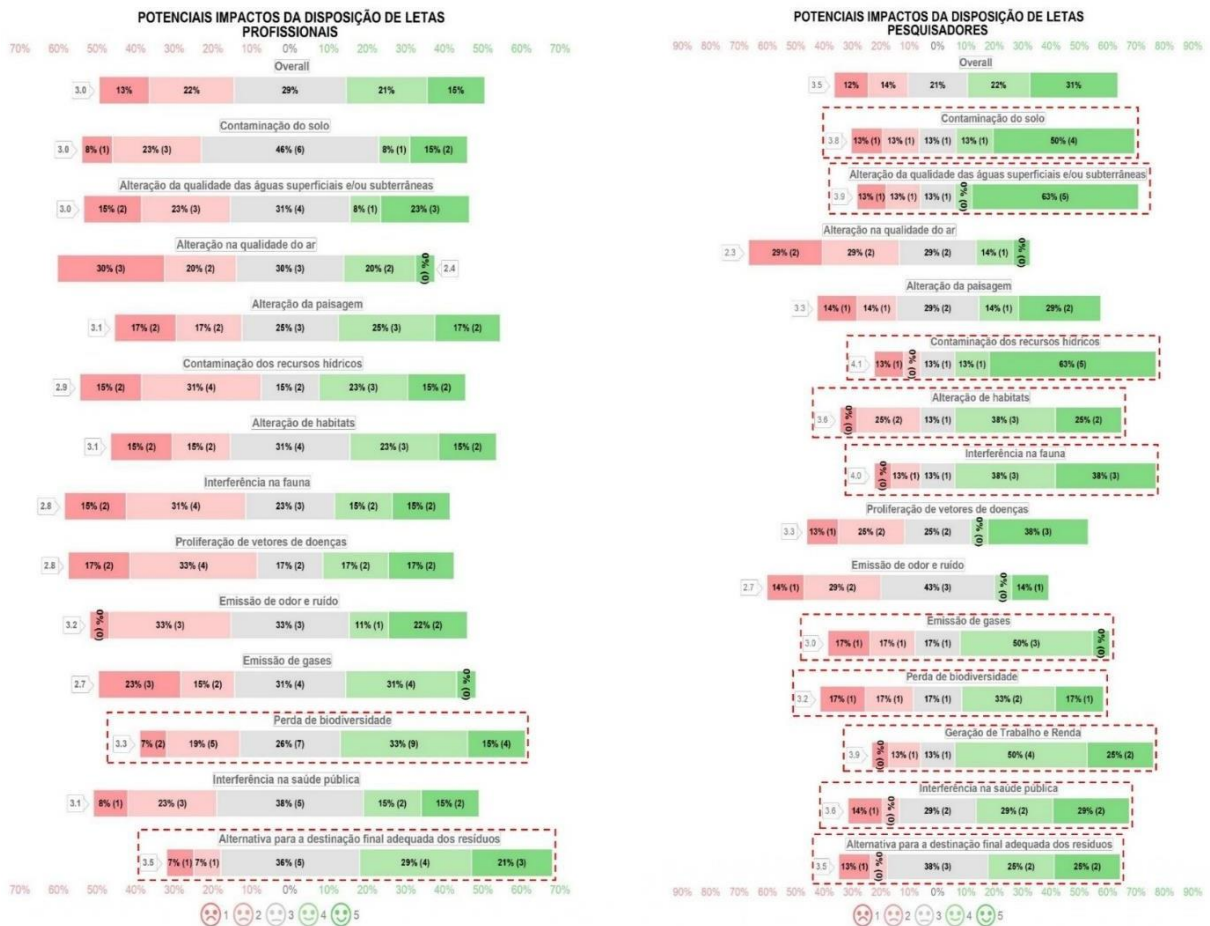


Figura 7- Potenciais impactos da disposição de LETAs como rejeitos em aterros sanitários.

A Figura 8, apresenta os gráficos gerados a partir do método AHP, representando os cálculos com base nas comparações da lista de potenciais impactos, a fim de identificar as prioridades nas avaliações de acordo com as percepções dos entrevistados. Com isso, foi possível identificar que os 3 impactos positivos mais relevantes na percepção dos profissionais da área do saneamento em ordem decrescente foram: geração de trabalho e renda; alternativa para a destinação final adequada dos resíduos e; alteração da paisagem.

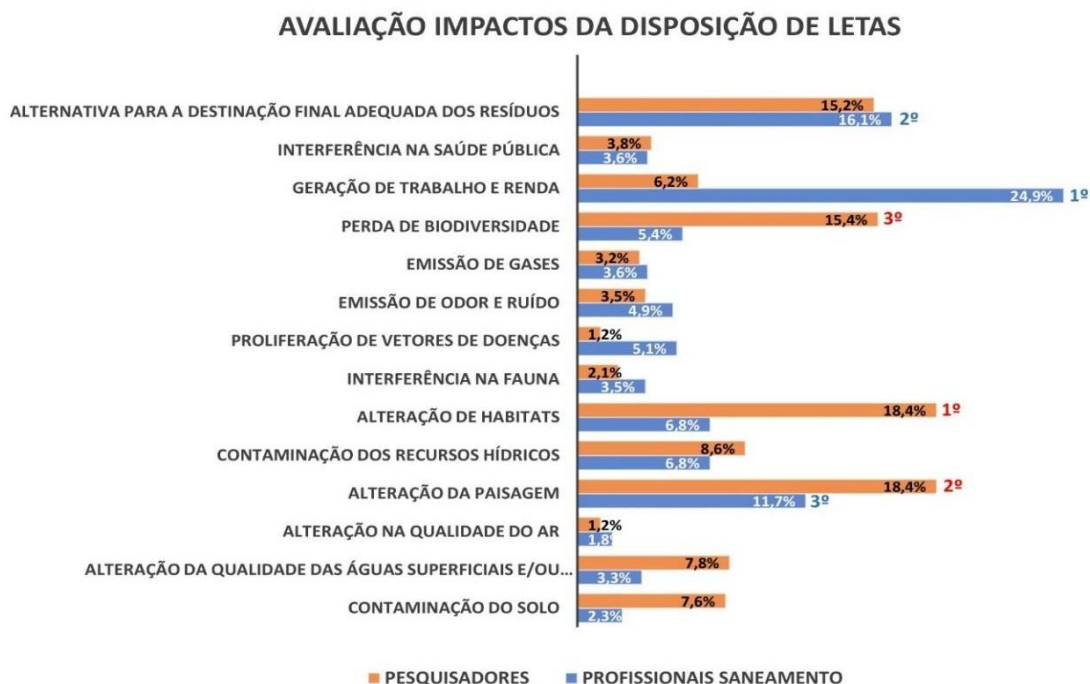


Figura 8 - Gráficos do método AHP para definição de prioridades de acordo com percepções.

No Brasil, as melhores práticas de destinação final associada aos LETAs é a disposição em aterros sanitários (FIORE *et al.*, 2022). Todavia, ainda que eles se configurem como uma alternativa de destinação final ambientalmente adequada, é impossível acreditar que eles sejam a solução única e definitiva (GONÇALVES *et al.*, 2017). A disposição dos LETAs em aterros já está sendo reduzida em muitas cidades modernas por causa da dificuldade em encontrar aterros sanitários, devido a necessidade de grandes áreas e dos custos de operação serem muito elevados, além do surgimento de legislações ambientais mais rigorosas que estão incentivando a busca de alternativas sustentáveis para a destinação final do lodo (AHMAD *et al.*, 2016). Além dessas desvantagens, de acordo com (FERNANDES *et al.*, 2019), os aterros sanitários são responsáveis por problemas sociais e econômicos provocados aos moradores que vivem nas proximidades destes ambientes e são potenciais causadores de alterações na paisagem regional.

Para os pesquisadores entrevistados nessa pesquisa, os potenciais impactos da disposição dos LETAs mais relevantes foram: alteração de *habitats*; alteração da paisagem e; perda de biodiversidade. De acordo com Porciuncula (2014), a construção e operação de um aterro sanitário possui impactos inerentes relacionados à remoção da vegetação que causa a degradação estética, a alteração do *habitat* devido a essa degradação, a perda da biodiversidade e a migração de animais para outras áreas.

A percepção dos profissionais da área do saneamento e dos pesquisadores quanto aos potenciais impactos ambientais da disposição de LETAs em aterros é diversa, com o primeiro grupo tendendo a priorizar impactos positivos e o segundo negativos. Também se verificou que os pesquisadores avaliaram maior quantidade de impactos dessa alternativa tecnológica, evidenciando maior rigor na

avaliação e entendimento prévio do assunto abordado. A percepção mais aprofundada de pesquisadores também foi evidenciada por Simões *et al.*, (2022) em seu trabalho sobre a percepção ambiental de diferentes atores sociais. Além disso, este resultado evidencia que ocorre pouca divulgação acerca dos potenciais impactos ambientais relacionados aos LETAs. Isto pode estar relacionado a quantidade e características dos trabalhos que vêm sendo publicados sobre a temática, que ainda se estabelecem com maior peso no âmbito de pesquisa do que em aplicações efetivas em ETAs de águas brasileiras.

4. CONCLUSÕES

Com base na pesquisa realizada, através da análise detalhada dos usos de lodo de estação de tratamento de água (LETA) em solos, apresentada neste texto, destaca a diversidade de aplicações desse resíduo e os potenciais impactos ambientais associados a cada classe de uso. A categorização em classes, como agente de adsorção, condicionador de solos e aplicação em áreas mineradas, evidencia a versatilidade dos LETAs, porém, também revela a complexidade na identificação dos impactos diretos e suas interações nos meios biofísicos e socioeconômicos.

A pesquisa, conduzida por meio de uma Survey, proporcionou a coleta de avaliações de profissionais da área de saneamento e pesquisadores, revelando diferentes perspectivas. A aplicação de uma análise estatística e sistematização dos dados, com o uso do ChartExpo e da calculadora do método AHP, contribuiu para a quantificação e priorização dos impactos ambientais, destacando aqueles percebidos como mais relevantes por cada grupo.

Também foi possível observar que os impactos ambientais referentes à disposição dos lodos de ETA ainda é um tema pouco conhecido, tanto no meio profissional quanto no âmbito da pesquisa. Alguns relatos de dificuldade ao responder o questionário reforçam este fato, pois muitos respondentes sinalizaram não conhecer alguns dos potenciais impactos ambientais descritos.

Apesar de algumas dificuldades pontuais, o formulário trouxe resultados muito enriquecedores para a pesquisa, já que abordou avaliações de públicos de diferentes áreas de conhecimento em saneamento, com percepções de acordo com suas vivências e contextos. Através deste, foi possível ampliar a percepção, tanto de pessoas que estão diretamente envolvidas no tratamento da água e na geração dos LETAs, quanto dos pesquisadores, que trazem uma abordagem científica e inovadora sobre o assunto. Além disso, o artigo une a percepção dos respondentes, com o conhecimento disponível na literatura já existente sobre a temática. Apesar do número ainda limitado de artigos, o que trouxe dificuldades para a discussão de certos pontos, as bases de dados científicas foram fundamentais para a construção do referencial teórico e discussões acerca do tema abordado.

Também foi possível perceber a inexistência de legislações específicas para a disposição de LETAs no solo, em aterros sanitários e de alguns impactos negativos desse processo, estudos também mostram um potencial para o uso dos LETAs em solos, trazendo assim impactos positivos que fortalecem esse uso benéfico. Isso vai de encontro com a Política Nacional dos Resíduos Sólidos que fomenta a

apresentação de alternativas técnicas para disposição final ambientalmente adequada para os resíduos sólidos gerados em sistemas de tratamento de água.

Dessa forma, foi possível concluir que ainda existe uma lacuna no que se diz respeito ao conhecimento dos potenciais impactos da disposição dos LETAs, e que esse assunto requer novos estudos e ampla divulgação, para que ações preventivas sejam efetivamente tomadas nas ETAs para a disposição adequada desses resíduos.

5. REFERÊNCIAS

ACKAH, La; Guru, R.; Peiravi, M.; Mohanty, M.; Ma, X.; Kumar, S.; Liu, J. Characterization of Southern Illinois Water Treatment Residues for Sustainable Applications. Sustainability, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10051374>.

AI, Y.; Lee, S.; Lee, J. Drinking water treatment residuals from cyanobacteria bloom-affected areas: Investigation of potential impact on agricultural land application. Science of The Total Environment, 706, 2020, 135756, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135756>.

ALVARENGA, P.; Ferreira, C.; Mourinha, C.; Palma, P.; de Varennes, A. Chemical and ecotoxicological effects of the use of drinking-water treatment residuals for the remediation of soils degraded by mining activities. Ecotoxicology and Environmental Safety. 161. 281 – 289, 2018 (<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.05.094>).

ARAB K., THOMPSON D.F., OLIVER I.W. Trialling Water-Treatment Residuals in the Remediation of Former Mine Site Soils: Investigating Improvements Achieved for Plants, Earthworms, and Soil Solution. Environmental Toxicology and Chemistry. 2020 May;39(6):1277-1291. DOI: 10.1002/etc.4706.

BENLLALA, A. Characterization and valorization of drinking water sludges applied to agricultural spreading. *Journal of Materials and Environmental Science*, Volume 6, Issue 6, Pages 1692 - 1698 2015.

BOSCOV, M.E.G.; Tsugawa, J.K.; Montalvan, E.L.T. Beneficial Use of Water Treatment Sludge in Geotechnical Applications as a Sustainable Alternative to Preserve Natural Soils. Sustainability 2021, 13, 9848. <https://doi.org/10.3390/su13179848>.

BRASIL. Lei Federal no 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9. 605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. (MMA) Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Consulta Pública. Brasília: [s. n.], 2020. Disponível em: <<http://consultaspublicas.mma.gov.br/planares/wp-content/uploads/2020/07/Plano-Nacional-de-Res%C3%ADduos-S%C3%B3lidos-Consulta-P%C3%ABlica.pdf>>. Acesso em: 02 fev. 2021.

CETESB. Roteiro para elaboração de estudo ambiental para implantação de aterro sanitário (capacidade superior a 10 t/dia), 2019. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/licenciamentoambiental/wpcontent/uploads/sites/32/2019/12/Manual_EIA_R AP_v_02.pdf.

CHEN C. F.; Ju, Y. R.; Lim, Y. C.; Hsieh, S. L.; Tsai, M. L.; Sun, P. P.; Katiyar, R.; Chen, C. W.; Dong, C. D. Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sludge from Water and Wastewater Treatment Plants by GC-MS. Int J Environ Res Public Health. 2019;16(14):2604. Published 2019 Jul 22. doi:10.3390/ijerph16142604. doi: 10.3390/ijerph16142604.

DOHIM, M., Abdelaal, A., Beheary, M., Abdullah, N., A. Razek, T. Compressive Strength of Geopolymeric Cubes Produced from Solid Wastes of Alum Industry and Drinking Water Treatment Plants. *Egyptian Journal of Chemistry*, 2019; 62(12): 2331-2340. doi: 10.21608/ejchem.2019.12745.1790.

FIGUEIREDO NETO, A. Utilização de lodo de estação de tratamento de água na produção de mudas de árvores com ocorrência no cerrado. Dissertação de mestrado. PPGEMA. Universidade

Federal de Goiás. <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/618>.

FIORE, F. A.; Rodgher, S.; Ito, C. Y. K.; Bardini, V. S. S.; Klinsky, L. M. G. Quality of surface water and generation of sludge at water treatment plants. *Rev. Ambient. Água*, vol. 15, n. 5, 2020. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2565>.

FIORE, F. A.; Rodgher, S.; Ito, C. Y. K.; Bardini, V. S. S.; Klinsky, L. M. G. Water sludge reuse as a geotechnical component in road construction: Experimental study. *Cleaner Engineering and Technology*, Volume 9, 2022, 100512, ISSN 2666-7908, <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100512>.

GROVES, R. M.; FOWLER JR., F. J.; COUPE, M. P.; LEPKOWSKI, J. M.; SINGER, E.; TOURANGEAU, R. *Survey Methodology*, 2nd Edition, 2009.

HOWELLS, P.A.; LEWIS, J.S.; BEARD, B.D.; OLIVER, W.I. Water treatment residuals as soil amendments: Examining element extractability, soil porewater concentrations and effects on earthworm. *Ecotoxicol Environ Saf.*, 2018 Oct 30;162:334-340. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.06.087.

IPPOLITO, J.A. Aluminum-Based Water Treatment Residual Use in a Constructed Wetland for Capturing Urban Runoff Phosphorus: Column Study. *Water Air Soil Pollut.* 2015. 226: 334. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-015-2604-2#citeas> >. Acesso em abril de 2019. IWMI. *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture: Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. London: Earthscan and Colombo: International Water Management Institute, 2007.

JI, Z.; Su, L.; Pei, Y. Synthesis and toxic metals (Cd, Pb, and Zn) immobilization properties of drinking water treatment residuals and metakaolin-based geopolymers. *Materials Chemistry and Physics*. 242. 2020. 122535. ISSN 0254-0584. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122535>.

KOOPMANS, G. F.; Hiemstra, T.; Vaseur, C.; Chardon, W. J.; Voegelin, A.; Groenenberg, J. E. Use of Iron Oxide Nanoparticles for Immobilizing Phosphorus In-Situ: Increase in Soil Reactive Surface Area and Effect on Soluble Phosphorus. *Science of The Total Environment*, 2020, 711, 135220. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.135220.

LAKATOS, Eva M. *Fundamentos de Metodologia Científica*. Disponível em: Minha Biblioteca, (9th edição). Grupo GEN, 2021.

LEMO, K., QUINTINO DE AGUIAR FILHO, S., & CAVALLINI, G. S. (2020). Avaliação Comparativa Entre Os Coagulantes Sulfato De Alumínio Ferroso E Policloreto De Alumínio Para Tratamento De Água: Estudo De Viabilidade Econômica. *DESAFIOS - Revista Interdisciplinar Da Universidade Federal Do Tocantins*, 7(1), 109–119. <https://doi.org/10.20873/uftv7-7824>.

LIU, Xin et al. The stability of drinking water treatment residue with ozone treatment. *Environmental Technology*, v.39, 13, pp. 1697-1704, 2018, publisher Taylor & Francis. doi = 10.1080/09593330.2017.1337231.

MAHDY, A. M, et al. "Use of Drinking Water Treatment Residuals In Reducing Bioavailability of Metals In Biosolid-amended Alkaline Soils." *Communications in soil science and plant analysis*, v. 43,.8 pp. 1216-1236. doi: 10.1080/00103624.2012.662819.

OLIVEIRA, A. P. S; Silva, J. B. G. S; Pereira, R. O; Santos, A. S. P. Avaliação dos atributos de um latossolo adubado com lodo de estação de tratamento de água. *Revista Internacional de Ciências*. V .5, n.2, jul./dez. 2015, 19p.

RAMALHO, R.P.R.S; Avaliação do uso de resíduo de estação de tratamento de água na produção de espécies vegetais com ocorrência no cerrado. UFJF. Juíz de Fora: 2016. Disponível em: < <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/5419> >. Acesso em julho de 2019.

RANKOVIC, Bojan et al. Utilization of gamma and e-beam irradiation in the treatment of waste sludge from a drinking water treatment plant. *Radiation Physics and Chemistry*, Volume 177, 2020, 109174, ISSN 0969-806X, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109174>.

RURAL, C., & MARIA, S. (2001). Fitotoxicidade do alumínio: Efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. 3, 531–541.

SANTOS, Lilian Maria *et al.* Net Promoter Score: Marketing de relacionamento: a utilização da ferramenta net promoter score (NPS) para mensurar a satisfação dos clientes. 2018. Disponível em: <<https://singep.org.br>>. Acesso em: 26 de agosto de 2018.

SANTOS, S. S. A.; CAMPOS, V. P. Utilização de Resíduo Sólido de Estação de Tratamento de Água (lodo), como Matéria Prima para Confecção de Elementos da Construção Civil. *Rev. Virtual*

Quim., 2018, 10 (2), 273-287. DOI: 10.21577/1984-6835.20180021.

SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos. 2. ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica; Agência Nacional de Águas, 2001.

SIMÕES, G., FIORE, F. A., & SILVA, L. C. (2022). Mapping of ecosystem services provided by the Paraíba do Sul river alluvial plains APA. *Ambiente e Sociedade*, 25. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20210188r2vu2022L2AO>.

ULLMANN, I.F.; TUNSIJØ, H.S.; ANDREASSEN, M.; NIELSEN, K.M.; LUND, V.; CHARNOCK, C. Detection of aminoglycoside resistant bacteria in sludge samples from Norwegian drinking water treatment plants (2019) *Frontiers in Microbiology*, 10 (MAR), art. no. 487. doi: 10.3389/fmicb.2019.00487.

UNDP - SIWI Water Governance Facility (2021). A Decade of Support for Water Governance Reform. Final Report of the GoAL WaSH Programme. Stockholm International Water Institute, Stockholm.

URBAN, R. C.; ISAAC, R. L.; MORITA, D. M. Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte. *Revista DAE*. Ed. 219, vol 67, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4322/dae.2019.050>.

XU, HANGZHOU ET AL. High-throughput sequencing reveals microbial communities in drinking water treatment sludge from six geographically distributed plants, including potentially toxic cyanobacteria and pathogens. *Science of The Total Environment*, Volume 634, 2018, Pages 769-779, ISSN 0048- 9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.008>.

YIN, R. K. Pesquisa qualitativa do início ao fim. Porto Alegre, RS, [s.n.], 2016.

ZHANG, YUNHUI; QIN, JUNDE; YI, YAOLIN. Biochar and hydrochar derived from freshwater sludge: Characterization and possible applications. *Science of The Total Environment*, Volume 763, 2021, 144550, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144550>.

ZHAO, Y. ; LIU, R.;Y AWE, O.W.;YANG, Y; SHEN, C. Acceptability of land application of alum- based water treatment residuals – An explicit and comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, 353, 2018, Pages 717-726, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.07.143>.

4. CAPÍTULO 2: EFEITO DA SECAGEM TÉRMICA NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO- QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DE LODOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Este artigo foi submetido para publicação na Revista Journal of Environmental Management. O trabalho foi submetido em Maio/2024.

EFEITO DA SECAGEM TÉRMICA NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO- QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DE LODOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

RESUMO

As Estações de Tratamento de Águas (ETAs) desempenham papel crucial na purificação da água para consumo humano. No entanto, o processo resulta na geração contínua de resíduos, conhecidos como Lodos de Estação de Tratamento de Água (LETA), cuja composição varia conforme a qualidade da água bruta, os métodos e insumos de tratamento empregados. A gestão e o manejo adequados dos LETAs são complexos, em função da elevada geração, da composição desses resíduos e da necessidade de secagem do material antes de seu uso benéfico ou disposição final. Esta pesquisa aplicada objetivou avaliar os efeitos da secagem térmica nas características físico-químicas e microbiológicas dos LETAs produzidos em uma ETA localizada no estado de São Paulo, durante duas diferentes estações climáticas (seca e chuvosa). Para tal, foi realizada a descrição do processo de secagem térmica de LETAs em operação na ETA e realizada análise exploratória das características dos lodos antes (desidratado) e após a secagem térmica (seco). Foram realizadas análises em massa bruta e nos extratos lixiviados e solubilizados das amostras de LETAs, considerando-se a norma brasileira de caracterização dos riscos à saúde humana e ambiental de resíduos. Os resultados evidenciaram que o processo de secagem térmica propiciou a redução da umidade dos LETAs de 62% no período seco e de 74% na estação chuvosa. Foi observado também que a secagem térmica propicia a inativação de microorganismos e que o produto dela resultante traz benefícios para as demais etapas do manejo deste resíduo. Ademais, também mostrou que os lodos (desidratado e seco) podem ser classificados como resíduos não perigosos e não inertes, se considerados os resultados das análises realizadas em massa seca e nos extratos solubilizados. No entanto, a presença dos elementos: bário, cromo e mercúrio, nos extratos lixiviados, evidencia a necessidade de realização de ensaio complementar de toxicidade para a adequada classificação desses resíduos.

Palavras-Chave: lodo de ETA; resíduos sólidos; secagem térmica; composição de lodo.

ABSTRACT

The Drinking Water Treatment Plants (DWTP) play a crucial role in purifying water for human consumption. However, the process results in the continuous generation of waste, known as Drinking Water Treatment Sludge (DWTS), whose composition varies according to the quality of the raw water and the treatment methods and inputs used. The proper management and handling of DWTS are complex due to the high generation, the composition of these wastes, and the need for drying the material before its beneficial use or final disposal. This applied research aimed to evaluate the effects of thermal drying on the physicochemical and microbiological characteristics of DWTS produced in a DWTP located in the state of São Paulo, during two different climatic seasons (dry and rainy). For this purpose, the description of the thermal drying process of DWTS in operation at the DWTP was carried out, and an exploratory analysis of the characteristics of the sludge before and after thermal drying was performed. Analyses were carried out on raw mass and on leached and solubilized extracts of DWTS samples, considering the Brazilian standard for characterizing the risks to human and environmental health of waste. The results showed that the thermal drying process provided a reduction in the moisture content of DWTS of 62% in the dry period and 74% in the rainy season. It was also observed that thermal drying provides the inactivation of microorganisms and that the resulting product brings benefits to the other stages of managing this waste. Furthermore, it also showed that the sludges (dehydrated) can be classified as non-hazardous and non-inert waste if the results of the analyses carried out on dry mass and solubilized extracts are considered. However, the presence of the elements: barium, chromium, and mercury, in the leached extracts, highlights the need for complementary toxicity testing for the proper classification of these wastes.

Keywords: WTP sludge; solid waste; thermal drying; sludge composition.

1. INTRODUÇÃO

As estações de tratamento de água (ETAs) têm como objetivo melhorar a qualidade das águas brutas e torná-las potável para o consumo humano (FURTADO *et al.*, 2021). No entanto, esse processo gera, de forma contínua, o resíduo comumente denominado lodo de ETA (LETA) (AHMAD *et al.*, 2016). A composição dos LETAs é variável e está diretamente associada à qualidade das águas brutas e aos processos e insumos utilizados para a potabilização e o desidratação dos lodos (FIORE *et al.*, 2020).

Dentre os materiais orgânicos e inorgânicos que compõem esses resíduos, destacam-se os óxidos de ferro e alumínio (GONZÁLEZ *et al.*, 2020), que são elementos presentes nos coagulantes comumente utilizados para a potabilização de águas em todo o mundo (GODOY *et al.*, 2020). Também já foram relatadas presença de metais pesados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos

(CHEN *et al.*, 2019) e microrganismos variados, tais como *Escherichia coli*, *Salmonellas*, *Criptosporidium* e Coliformes totais, além de *Enterococcus faecalis*, *E. faecium*, *Clostridium perfringens* (BURGOS *et al.*, 2016) e de bactérias resistentes a antibióticos (ULLMANN *et al.*, 2019). O manejo e a destinação de LETAs são complexos, em decorrência de sua composição e sua disposição inadequada pode provocar a degradação do meio ambiente, com a contaminação de mananciais e de solos (MENEZES, 2006). Para que seja possível determinar as melhores oportunidades para o gerenciamento desses lodos, se fazem necessárias caracterizações físico-químicas e microbiológicas (GODOY *et al.*, 2019). O Brasil e a China são os países com maior número de publicações que abordam a caracterização de LETAs (AMORIM *et al.*, 2022). No entanto, os resultados dessas pesquisas, em geral, não especificam os locais e as condições em que as amostras desses resíduos foram obtidas nas ETAs e nem mesmo os tratamentos preliminares a que foram submetidas (BABATUNDE & ZHAO, 2007).

No contexto das cidades e comunidades sustentáveis, deve haver a busca pela reintrodução desses resíduos na cadeia produtiva, para convergência com os princípios da economia circular (COSENZA *et al.*, 2020). Dentre as soluções apontadas como tecnicamente viáveis para o uso benéfico de LETAs estão aquelas que prevêem a incorporação do material como substituto parcial de argilas, na produção de materiais cerâmicos (ALVARENGA *et al.*, 2019); substituto parcial de cimento Portland, em pastas, argamassas e concretos; precursor ou agregado geopolimérico, bem como elemento da construção civil em obras geotécnicas de aterros sanitários (GONÇALVES *et al.*, 2017), em áreas mineradas e para a construção de bases e sub-bases de pavimentos (FIORE *et al.*, 2022).

Para que esse resíduo obtenha teores de sólidos adequados a essas diferentes aplicações, são demandados tratamentos preliminares tais como o adensamento e o desaguamento (ANDRADE, *et al.*, 2014). Esses tratamentos propiciam significativa remoção de água do resíduo e viabilizam as demais etapas de manejo, mas também determinam o emprego de novos insumos, equipamentos e energia. Esses processos promovem a redução da umidade através da separação entre as fases líquida e sólida no tratamento dos LETAs, porém é uma tarefa difícil e dispendiosa. Os métodos mecânicos de separação entre líquido e sólido mais conhecidos, são comumente chamados de desidratação mecânica ou, ainda, desaguamento, podem ser feitos através de: filtros prensa, filtros prensa de esteira e centrífugas. Todavia, os lodos desidratados ainda contêm elevados teores de umidade, acima de 70% (JANUÁRIO & FILHO, 2007), sendo assim, os usos benéficos referidos na literatura, em geral, são avaliados após a secagem do material em temperaturas da ordem de 100° C ou ao ar livre (SILVA *et al.*, 2021).

A secagem térmica de LETAs figura como potencial tratamento preliminar desses resíduos, pois além de adequar o teor de umidade do material para níveis desejáveis de forma rápida, também pode promover a remoção de substâncias voláteis do material, assim como microrganismos (SILVA *et al.*, 2021). Com o uso da secagem pode-se obter teores de sólidos da ordem de 90 a 95% e, com isso,

reduzir significativamente a massa final dos lodos a ser destinada. O resultado desse processo é um produto de fácil manuseio, destinação e aplicabilidade (LOBATO, 2011). Para além da redução do volume, a secagem térmica melhora as condições de armazenamento, transporte e disposição final desse resíduo (YANG *et al.*, 2023).

Os poucos estudos publicados sobre a temática são incipientes e evidenciam a necessidade de aprofundamento de pesquisas associadas às potencialidades do tratamento térmico de LETAs, principalmente em equipamentos que operem em escala real. Nesse contexto, esse estudo foi realizado com o objetivo de avaliar o impacto da secagem térmica nas características físico-químicas e microbiológicas de lodos de estação de tratamento de água, por meio de estudo de caso exploratório em ETA localizada no estado de São Paulo, Brasil.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

Este trabalho estudou lodos produzidos em estação de tratamento de água localizada na região metropolitana de São Paulo (SP) durante duas diferentes estações climáticas (seca e chuvosa de 2022 e seca de 2023). Destaca-se que as condições climáticas no território de implantação da ETA evidenciam a existência de período chuvoso e seco bem definidos, com precipitações médias mensais na série histórica dos últimos 24 anos, da ordem de 175 e 55 mm, respectivamente (SABESP, 2023). Na estação de tratamento de água estudada, as águas brutas captadas superficialmente são encaminhadas ao processo convencional de potabilização, que é composto pelas seguintes etapas: coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção, antes e após o tratamento, fluoretação e correção de pH. Dentre os insumos utilizados na ETA estão o Sulfato de Alumínio ou Policloreto de Alumínio (PAC) e o polímero catiônico.

A ETA trata cerca de 15m³/s de água diariamente para fins de atendimento ao padrão de potabilidade brasileiro (BRASIL, 2021). Para fins de adequar o teor de umidade dos LETAs, também opera em suas dependências as etapas de adensamento e desidratação dos LETA. Após desidratados, os LETAs são encaminhados para secagem térmica complementar realizada por equipamento em escala real, com capacidade de 163 toneladas/dia.

2.1.1. Sistema de Adensamento e Desidratação de Lodo na ETA estudada

O sistema de adensamento e desidratação dos LETAs da estação de potabilização de águas estudada, tem como finalidade desidratar os lodos provenientes das etapas de decantação, filtração e da clarificação da água de lavagem dos filtros, antes do seu retorno para o início do processo. Considerada a sequência das operações unitárias existentes na ETA, a composição dos lodos pode ter materiais que conferem cor e turbidez à água bruta, bem como por flocos de sulfato de alumínio ou policloreto de alumínio e demais insumos que são adicionados à água de modo a propiciar a floculação e remoção dos sólidos. Eventualmente, em função da qualidade da água bruta, também é utilizado no processo, carvão ativado em pó como adsorvente.

Os lodos provenientes dos decantadores e do Sistema de Recuperação de Água de Lavagem (SRAL) passam por um gradeamento e são encaminhados às caixas de retenção de areia para em seguida serem encaminhados aos tanques de equalização, que são considerados como a primeira etapa de tratamento dos lodos, conforme mostrado na Figura 1.

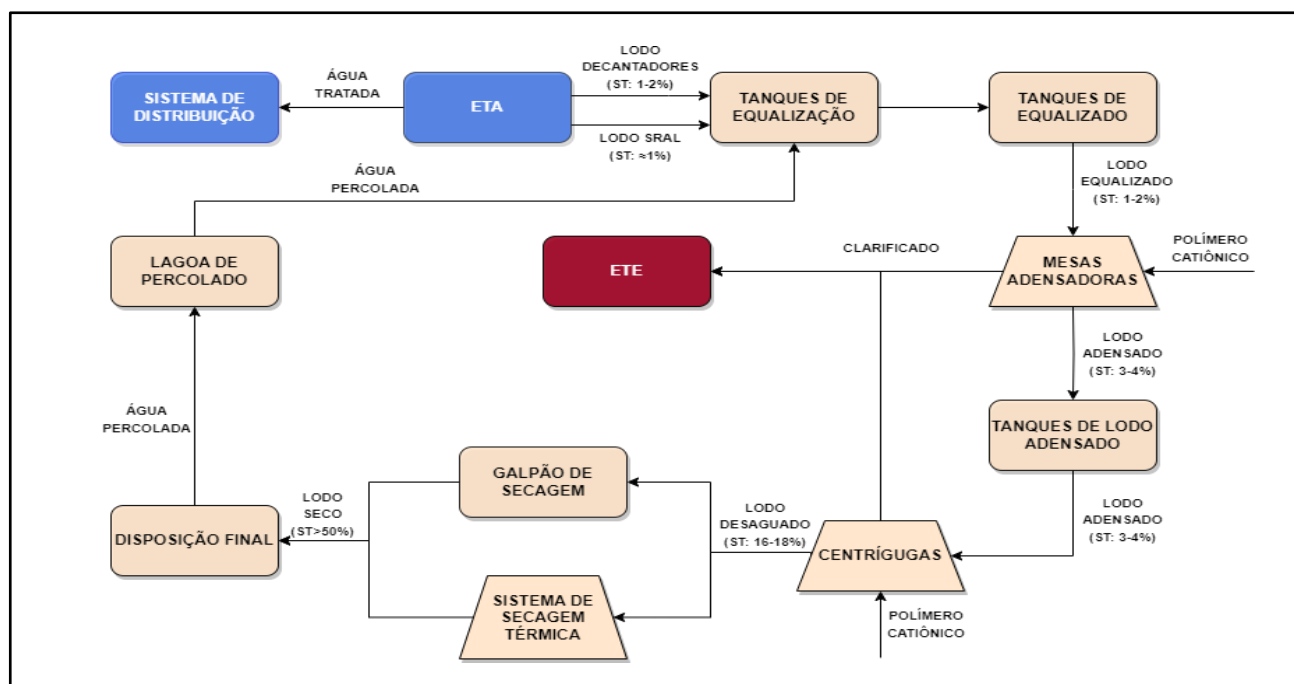


Figura 1. Fluxograma geral do sistema de adensamento, desidratação e secagem de lodo.

Os tanques de equalização, além de permitirem o contínuo bombeamento para as fases subsequentes do processo, também promovem a homogeneização das características dos LETAs. A equalização também garante a minimização da variabilidade das características físico-químicas dos lodos decantados e, assim, permite maior previsibilidade nos processos de adensamento e desaguamento.

Após a equalização, os lodos são transferidos por gravidade para tanques de armazenamento a partir dos quais são bombeados para a etapa de adensamento, em mesas adensadoras. O adensamento é propiciado pela ação flocculante de solução polimérica adicionada ao processo. Logo após, os lodos adensados são armazenados em tanques específicos com agitação mecânica antes de serem encaminhados para a etapa de desaguamento em centrífugas.

Nas centrífugas, os lodos adensados recebem uma nova dosagem de solução de polimérica e são submetidos à centrifugação, que proporciona a máxima remoção de água livre possível, utilizando-se do processo de separação mecânica. Os lodos desidratados pelas centrífugas são encaminhados para o sistema de pós-secagem térmica a fim de promover a elevação do teor de sólidos e garantir as próximas etapas de destinação adequada do resíduo. O clarificado gerado nos processos de adensamento e desidratação é encaminhado à estação elevatória de clarificado e posteriormente para a ETE.

2.1.2. Sistema de Secagem Térmica de Lodo

O sistema de secagem térmica de LETAs em operação na ETA estudada, mostrado na Figura 2, foi implantado para atender as exigências técnicas impostas pelos órgãos ambientais competentes e possui as devidas licenças ambientais. O funcionamento do sistema consiste na utilização de uma fonte de calor (vapor) para a secagem dos LETAs, já que o material que apresenta baixo poder calorífico e alto teor de inorgânicos. Além do secador e seus periféricos (ciclone para retenção de material fino, exaustor e lavador de gases), o sistema é composto por uma caldeira para fornecimento de energia térmica aos equipamentos na forma de vapor d'água. A caldeira utiliza como combustível, cavaco de madeira reciclada em sua fornalha, para aquecer a água e transformá-la em vapor.

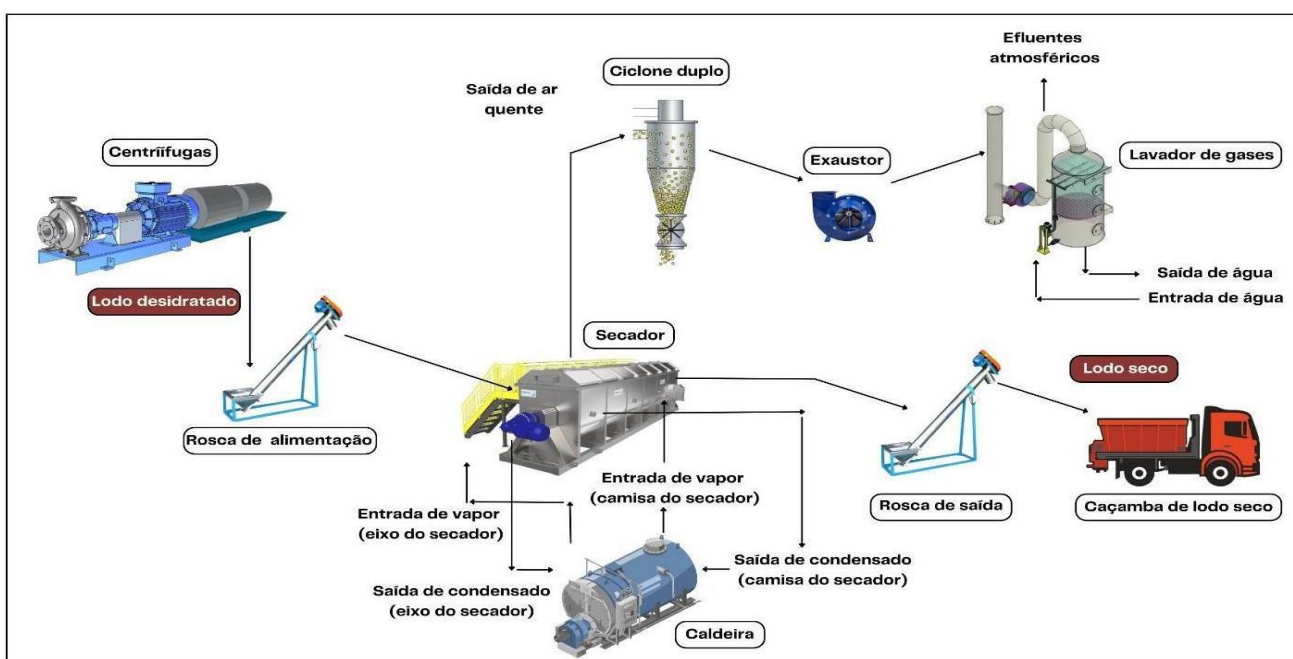


Figura 2. Fluxograma do sistema de secagem térmica.

Nesse processo, a energia térmica é conduzida do fluido de transferência de calor para a parede de metal e, em seguida, da parede metálica para o sólido. A energia térmica, contida no vapor d'água, é transferida na forma de calor para a rosca e a camisa do secador e, por condução, o calor é transferido para o lodo, que perde parte de sua água por evaporação. A temperatura de trabalho do secador varia entre 150 a 180°C e o tempo de permanência dos lodos dentro do equipamento é de cerca de 2 horas. Após esse período, ocorre um aumento do teor de sólidos dos LETAs com percentual igual ou superior a 50%.

2.2. Coleta e Preparação das Amostras

Para a realização dessa pesquisa foram coletadas 3 amostras de cada LETAs desidratados e pós

secagem térmica (lodo desidratado e lodo seco, mostrados na Figura 2), em diferentes meses do ano (agosto 2022; dezembro de 2022; e agosto de 2023), representativos do período seco e chuvoso ocorrentes no território de inserção da atividade. Para a coleta das amostras, foram observados os procedimentos especificados pela NBR 10007 (ABNT, 2004).

2.3. Caracterização Físico-Química

Para a caracterização do resíduo, foram realizadas análises com o intuito de avaliar a composição físico-química e microbiológica dos lodos antes e após a secagem térmica (desidratado e seco). Os LETAs foram caracterizados pela avaliação da massa bruta, lixiviado e extrato solubilizado. Os ensaios foram realizados de acordo com as normas 10004, 10005 e 10006 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), em laboratório acreditado de acordo com a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025: 2017, coordenada pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). As Tabelas 1 e 2 apresentam os métodos analíticos adotados nesse estudo para a caracterização físico-química e microbiológica, respectivamente.

Tabela 1. Métodos analíticos para caracterização físico-química.

| Análise | Métodos Utilizados |
|--|---|
| Inflamabilidade | POP 173 |
| Corrosividade pH 1:1 Reatividade | NBR 10004 (ABNT, 2004) |
| Sulfeto de Hidrogênio | POP 061 |
| Líquidos Livres | NBR 12988 (ABNT, 1993) |
| Óleos e Graxas Totais | Método 5520 E (SMEWW, 2017) |
| Teor de Umidade Teor Sólidos Secos | POP 174 |
| Cianeto Total Cianeto de Hidrogênio | EPA SW-846 - 9013 A – 2004; (SMEWW, 2017) Método 4500CN- E |
| Arsênio Total Bário Total Cádmio Total Chumbo Total Cromo Total Prata Total Selênio Total Ferro Total | Método 3120 B (SMEWW, 2017) |
| Fluoreto | Método 4500-F-, B e C (SMEWW, 2017) |
| Mercúrio Total | POP 036 |

Tabela 2. Métodos analíticos para caracterização microbiológica.

| Análise | Método Analítico |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| Coliformes Termotolerantes (Fecais) | Método 4500-F-, B e C (SMEWW,2017) |
| Coliformes Totais | Método 9221 A, B e C (SMEWW,2017) |
| <i>Escherichia coli</i> | Método 9221 A, C e F (SMEWW,2017) |
| Ovos Viáveis de Helmintos | EPA 625 R-92/013, (SMEWW, 2003) |
| <i>Salmonella sp</i> | Método 9260 B (SMEWW, 2017) |

2.4. Análise dos Resultados

Para a análise dos resultados considerou-se os valores de referência da NBR 10004 (ABNT, 2004) para os parâmetros analisados comparando os resultados obtidos para o lodo antes e após secagem térmica. Além disso, realizou-se uma análise sistemática dos dados, discutindo assim, sobre o comportamento dos principais parâmetros em cada período e os aspectos e impactos ambientais associados ao manejo desses LETAs.

Para discorrer sobre o efeito da secagem térmica nas características físico-químicas e microbiológicas, comparou-se os resultados obtidos por meio dos relatórios técnicos de caracterização, que tem como referência a NBR 10004 (ABNT, 2004). Além disso, foram equiparados os limites estabelecidos pela norma nacional brasileira com a norma Internacional EPA SW 846, emitida pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (Environmental Protection Agency, EPA), que fornece diretrizes detalhadas para a coleta, preservação e análise de amostras de resíduos sólidos, para avaliação da presença de poluentes e substâncias químicas perigosas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização do LETA antes e após a secagem térmica

As Tabela 3 e 4 apresentam os resultados da caracterização físico-química da massa bruta e microbiológica respectivamente, referente às amostras de lodo desidratado e lodo seco termicamente.

Tabela 3. Caracterização da massa bruta.

| Parâmetros | Padrão de Referência NBR 10004:2004 | Análise I Estação Seca - Ago/22 | | Análise II Estação Chuvosa - Dez/22 | | Análise III Estação Seca - Ago/23 | |
|------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------|--|-----------|--------------------------------------|-----------|
| | | Lodo desidratado | Lodo seco | Lodo desidratado | Lodo seco | Lodo desidratado | Lodo seco |

| | | | | | | | |
|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Inflamabilidade | Ausência | Ausência | Ausência | Ausência | Ausência | Ausência | Ausência |
| Corrosividade | Não corrosivo | Não Corrosivo | Não Corrosivo | Não Corrosivo | Não Corrosivo | Não Corrosivo | Não Corrosivo |
| pH (1:1 água :lodo) | 2,0 a 12,5 | 6,28 | 5,58 | 8,03 | 6,65 | 7,30 | 6,61 |
| Reatividade | Não Reativo | Não Reativo | Não Reativo | Não Reativo | Não Reativo | Não Reativo | Não Reativo |
| Sulfeto de Hidrogênio (mg/kg) | 500 | 7,8 | 9,3 | < 0,1(*) | < 0,1(*) | < 0,1(*) | < 0,1(*) |
| Líquidos Livres (Ausente/Presente) | NE | Ausente | Ausente | Presente | Ausente | Ausente | Ausente |
| Óleos e Graxas Totais (%) | NE | 0,1 | 0,7 | 0,2 | 0,3 | 0,001 | 0,0 |
| Teor de Umidade (%) | NE | 82,2 | 31,1 | 78,6 | 20,1 | 84,4 | 32,0 |
| Teor Sólidos Seco (%) | NE | 17,8 | 68,9 | 21,4 | 79,9 | 15,6 | 68,0 |

Onde: (*) abaixo do limite de quantificação. NE – Não Estabelecido.

Os resultados apresentados na Tabela 3, evidenciam que os lodos (desidratado e seco) não apresentam os riscos de inflamabilidade, corrosividade ou reatividade, em ambas as estações (seca e chuvosa), se considerados os valores referenciais dispostos na norma NBR 10004 (ABNT, 2004). A ausência de corrosividade nos LETAs oferece uma série de benefícios relacionados à manutenção de equipamentos, à proteção ambiental, à segurança no trabalho e à eficiência operacional. Pois lodos corrosivos, podem danificar equipamentos, tubulações, sistemas de armazenamento e transporte que são utilizados durante o manejo de resíduos. Além disso, a corrosão pode levar à liberação de metais pesados e substâncias químicas nocivas ao meio ambiente (BOTERO *et al.*, 2021). Já a ausência de inflamabilidade dos LETAs pode ser traduzida como segurança quanto aos riscos de incêndios e explosões durante o manuseio, transporte e armazenamento desses resíduos. Isso traz maior segurança quanto à exposição dos trabalhadores e para as instalações envolvidas no tratamento, armazenamento temporário e disposição desse tipo de lodo (CREMADES *et al.*, 2018).

Os dados evidenciam que a umidade dos lodos desidratados nos períodos seco e chuvoso de 2022 e 2023, é da ordem de 80%, e isso converge com dados reportados por Silveira *et al.*, (2013). Evidenciam também que o processo de secagem térmica é efetivo na diminuição do teor de umidade dos LETAs, pois, no período seco e chuvoso foi capaz de reduzir 62% (ago/22), 74% (dez/22) e 62% (ago/23) da umidade dos mesmos. Essa redução da umidade apresenta diversas vantagens, dentre elas destaca-se: a redução do volume total dos LETAs com benefícios diretos para todas as demais etapas de manejo; e a produção de material com menor densidade, o que reduz os custos do transporte e destinação.

Destaca-se que no período chuvoso do ano de 2022 houve a dosagem de carvão ativado no

tratamento da água e que esse insumo afetou diretamente o processo de desidratação e secagem agregando massa aos LETAs, fator que pode ser observado pelo aumento de 22% no teor de sólidos do lodo desidratado do período seco para o chuvoso do ano de 2022. Além disso, verificou-se um aumento no teor de sólidos da secagem térmica no período em que foi dosado o carvão. Esses resultados revelam que o uso de carvão ativado no tratamento de água deve ser considerado na determinação das características dos LETAs e que mudanças eventuais no processo de tratamento da água devem ser consideradas para o adequado manejo desses resíduos, uma vez que podem, inclusive afetar a secagem térmica dos mesmos.

Observou-se também, a presença de sulfeto de hidrogênio nos LETAs em agosto de 2022, mesmo que em baixa concentração quando comparado aos limites para resíduos perigosos dispostos na NBR 10004 (ABNT, 2004), e valores abaixo do limite de quantificação do método em dezembro de 2022 e agosto de 2023. O sulfeto de hidrogênio não é uma substância comumente encontrada na água bruta e esse resultado para o período chuvoso de 2022, pode ser justificado pela sua insolubilidade em água, sendo removido assim na fase sólida do processo de tratamento. Além disso, observou-se uma concentração desse elemento após a secagem térmica, o que ocorre devido à concentração dos sólidos na secagem.

Em relação ao pH das amostras, observou-se que, em ambos os períodos climáticos, após a secagem térmica houve uma diminuição do pH dos lodos analisados em cerca de 10 e 17% para os períodos seco e chuvoso, respectivamente. Para melhor caracterização desse fenômeno, se faz necessária a determinação do balanço de massa da ETA e da análise da alcalinidade desses LETAs.

Tabela 4. Caracterização microbiológica.

| Parâmetros | Análise I Estação Seca - Ago/22 | | Análise II Estação Chuvosa - Dez/22 | | Análise III Estação Seca - Ago/23 | |
|--|------------------------------------|-----------------------|--|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| | Lodo desidratado | Lodo seco | Lodo desidratado | Lodo seco | Lodo desidratado | Lodo seco |
| Coliformes Totais (NMP/100g) | 230 | < 1,8 ^(*) | 4,9 x 10 ³ | 23 | < 1,8 ^(*) | < 1,8 ^(*) |
| Coliformes Termotolerantes (NMP/100g) | < 1,8 ^(*) | < 1,8 ^(*) | < 1,8 ^(*) | < 1,8 ^(*) | < 1,8 ^(*) | < 1,8 ^(*) |
| Escherichia coli (NMP/100g) | < 1,8 ^(*) | < 1,8 ^(*) | < 1,8 ^(*) | < 1,8 ^(*) | < 1,8 ^(*) | < 1,8 ^(*) |
| Ovos Viáveis de Helmintos (ovo/g ST) | < 0,01 ^(*) | < 0,01 ^(*) | < 0,01 ^(*) | < 0,01 ^(*) | < 0,01 ^(*) | < 0,01 ^(*) |
| Salmonella sp (Ausente /Presente) | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente | Ausente |

Onde: (*) abaixo do limite de quantificação.

Os coliformes totais identificados no lodo desidratado em agosto de 2022 (período seco), foram inviabilizados pelo processo de secagem térmica, uma vez que se verificou a redução da concentração desses para valores abaixo do limite de quantificação do método (LQ). Para o período chuvoso deste mesmo ano, a concentração de coliformes totais se mostrou elevada e observou-se que a secagem térmica dos LETAs foi capaz de garantir uma redução de 95% da concentração desses microrganismos. Esse resultado corrobora com aquele reportado por SILVA *et al.* (2021) e está associado à temperatura de trabalho do secador térmico (150 a 180°C), que atua com um tempo de detenção de aproximadamente 2 horas, promovendo assim elevado potencial para inativação das bactérias do grupo coliformes totais e *escherichia coli* nos LETAs, as quais são inativadas a partir de 50°C e 60°C, respectivamente, com tempos de detenção aplicados de 15 e 30 minutos para ambos (RODRIGUES, 2011). Já nas amostras analisadas em agosto de 2023, período seco, não foram identificados coliformes totais tanto no lodo desidratado quanto no seco.

A partir da caracterização microbiológica foi possível verificar que as amostras de lodo desidratado não apresentaram coliformes termotolerantes (fecais), *Escherichia coli*, ovos viáveis de helmintos e *Salmonella sp* tanto na estação seca quanto na estação chuvosa de 2022 e 2023. Sendo assim, não foi possível verificar a eficiência do sistema na redução desses parâmetros. Todavia, Leite *et al.* (2023) em seu estudo sobre a composição microbiológica de LETAs de alumínio verificou a presença de *Escherichia coli* em todas as amostras de lodo desidratado. De acordo com os autores, esse resultado está relacionado à variação da composição da água captada, parâmetros e condições ambientais da região. A patogenicidade confere risco à saúde humana e ao meio ambiente e, por isso, é considerado como um dos fatores que classificam os resíduos como perigosos (ABNT, 2004).

Nas Tabelas 5 e 6 apresentam-se as concentrações de elementos presentes nas amostras de LETAs avaliadas, por meio dos seus extratos lixiviados e solubilizados, respectivamente, referente às amostras de lodo desidratado e lodo seco termicamente.

Tabela 5. Elementos químicos presentes em extratos lixiviados.

| Parâmetros | Padrão de Referência NBR 10004:200 4 | Análise I Estação Seca - Ago/22 | | Análise II Estação Chuvosa - Dez/22 | | Análise III Estação Seca - Ago/23 | |
|----------------------|---|------------------------------------|-------------|--|-------------|--------------------------------------|-------------|
| | | Lodo desidratado | Lodo seco | Lodo desidratado | Lodo seco | Lodo desidratado | Lodo seco |
| Arsênio Total (mg/L) | 1 | <0,0014(**) | <0,0014(**) | <0,0014(**) | <0,0014(**) | <0,0014(**) | <0,0014(**) |
| Bário Total (mg/L) | 70 | 0,637 | 0,903 | 0,878 | 1,04 | 0,409 | 1,266 |
| Cádmio Total (mg/L) | 0,5 | <0,0003(**) | <0,0003(**) | <0,0003(**) | <0,0003(**) | <0,0003(**) | <0,0003(**) |
| Chumbo Total (mg/L) | 1 | <0,0005(**) | 0,006 | 0,065 | 0,018 | <0,005(**) | <0,0005(**) |

| | | | | | | | |
|-----------------------|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Cromo Total (mg/L) | 5 | <0,0008(**) | <0,0008(**) | <0,0008(**) | <0,0008(**) | <0,025(*) | <0,0008(**) |
| Fluoreto (mg/L) | 150 | 0,21 | 0,19 | 0,35 | 0,52 | 0,32 | 0,82 |
| Mercúrio Total (mg/L) | 0,1 | <0,0015(**) | <0,0015(**) | <0,0015(**) | <0,0015(**) | <0,0015(**) | <0,0015(**) |
| Prata Total (mg/L) | 5 | <0,0005(**) | <0,0005(**) | <0,0005(**) | <0,0005(**) | <0,0005(**) | <0,0005(**) |
| Selênio Total (mg/L) | 1 | <0,0013(**) | <0,0013(**) | <0,0013(**) | <0,0013(**) | <0,0013(**) | <0,0013(**) |

Onde: (*) abaixo do limite de quantificação e (**) abaixo do limite de detecção.

Na análise dos extratos lixiviados dos LETAs, para todos os elementos avaliados as concentrações se mostraram inferiores aos limites brasileiros que determinam a ocorrência de riscos intrínsecos de toxicidade. No entanto, conforme determinado pela mesma regulamentação (BRASIL, 2004), a presença de elementos como bário, cromo e chumbo determinam a necessidade de ensaios complementares de toxicidade para a correta classificação desses resíduos. Esses elementos em LETAs também foram verificados por De Almeida *et al.* 2023 e Hasan *et al.* 2022.

Foi observado que, após secagem térmica, as amostras de lodo possuíam maiores concentrações de bário, em ambos os anos (2022 e 2023). Isso pode estar relacionado a redução do teor de umidade e consequente concentração dos sólidos. O aumento da concentração de bário decorrente da secagem térmica foi de 29% no período seco e 16% no período chuvoso de 2022 e 209% no período seco de 2023. Para o chumbo, na estação seca de 2022 essa concentração foi 92%, o que não foi observado no mesmo período de 2023. Já no período chuvoso de 2022, houve uma redução de 72% da concentração. Destaca-se que não se espera que ocorra a diminuição da concentração de chumbo, a partir da secagem térmica dos lodos, como mostrada nos resultados. No entanto, considerando o fato de que os gases emitidos pelo sistema não foram avaliados, não é possível fazer inferências sobre o fluxo do elemento.

A baixa concentração de metais pesadas nos LETAs avaliados é fator positivo relacionado à característica do resíduo, pois em altas concentrações, metais pesados como: arsênio, cádmio, chumbo, prata, bário, mercúrio e cromo, podem ter efeitos adversos à saúde humana e afetar: o sistema nervoso, o desenvolvimento cerebral, os sistemas circulatório e renal, bem como causar danos aos ossos e ao sistema reprodutivo (SANTOS *et al.*, 2018). Além de que, em contato com o meio ambiente esses elementos podem afetar a qualidade dos solos e aumentar o risco de contaminação das águas subterrâneas próximas (AHMAD *et al.*, 2016).

O fluoreto é uma substância comumente encontrada na água bruta, porém no processo de tratamento da água, frações insolúveis desse elemento podem ser removidas juntamente com a fase sólida. Dessa forma, a concentração dos sólidos e de alguns elementos, também justifica o aumento do valor encontrado para o fluoreto no período chuvoso de 2022 e seco de 2023 após a secagem térmica. No entanto, em agosto de 2022 (período seco), observou-se uma diminuição da concentração

de fluoreto após a secagem térmica, o que pode ser justificado pela possível formação de compostos voláteis.

Destaca-se que a norma brasileira NBR 10004 (ABNT, 2004) possui limites mais restritivos do que a norma americana EPA SW 846, emitida pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*Environmental Protection Agency – EPA, 1992*), que avalia a toxicidade das substâncias químicas presentes nos resíduos analisados. Sendo assim, todos os valores encontrados de concentração dos elementos nas amostras de lodos, atendem também aos limites estabelecidos pela norma americana.

Tabela 6. Elementos químicos presentes em extratos solubilizados.

| Parâmetros | Padrão de Referência NBR 10004:2004 | Análise I Estação Seca - Ago/22 | | Análise II Estação Chuvosa - Dez/22 | | Análise III Estação Seca - Ago/23 | |
|-----------------------|---|------------------------------------|--------------|--|--------------|--------------------------------------|--------------|
| | | Lodo desidratado | Lodo seco | Lodo desidratado | Lodo seco | Lodo desidratado | Lodo seco |
| Alumínio Total (mg/L) | 0,2 | <0,0037(**) | <0,0037(**) | 0,04 | 0,03 | 0,051 | 0,987 |
| Arsênio Total (mg/L) | 0,01 | <0,0014(**) | <0,0014(**) | <0,0014(**) | <0,0014(**) | <0,0014(**) | <0,0014(**) |
| Bário Total (mg/L) | 0,7 | 0,093 | 0,244 | 0,007 | 0,009 | 0,165 | 0,627 |
| Cádmio Total (mg/L) | 0,005 | <0,0003(**) | <0,0003(**) | <0,0003(**) | <0,0003(**) | <0,0003(**) | <0,0003(**) |
| Chumbo Total (mg/L) | 0,01 | <0,0005(**) | <0,0005(**) | <0,0005(**) | <0,0005(**) | <0,0005(**) | <0,0005(**) |
| Ferro Total (mg/L) | 0,3 | 3,394 | 0,297 | 1,32 | <0,025 | 23,64 | 6,95 |
| Fluoreto (mg/L) | 1,5 | 0,2 | 0,15 | 0,15 | <0,1(*) | <0,1(*) | 0,1 |
| Manganês Total (mg/L) | 0,1 | 2,069 | 9,303 | 1,364 | 0,795 | 6,539 | 20,2 |
| Mercúrio Total (mg/L) | 0,001 | <0,00004(**) | <0,00004(**) | <0,00004(**) | <0,00004(**) | <0,00004(**) | <0,00004(**) |
| Prata Total (mg/L) | 0,05 | <0,0005(**) | <0,0005(**) | <0,0005(**) | <0,0005(**) | <0,0005(**) | <0,0005(*) |
| Selênio Total (mg/L) | 0,01 | <0,0013(**) | <0,0013(**) | <0,0013(**) | <0,0013(**) | <0,0013(**) | <0,0013(**) |

Onde: (*) abaixo do limite de quantificação e (**) abaixo do limite de detecção.

Na análise do extrato solubilizado, mostrado na Tabela 6, evidencia que os elementos Mn, Fe e Al estão presentes nos LETAs em concentrações acima daquelas referidas pela norma NBR 10004:2004. Por isso, se considerados os extratos solubilizados, os LETAs podem ser classificados como resíduos não perigosos e não inertes (Classe IIA). A maior concentração dos elementos Mn, Fe e Al, pode ser decorrente das características da água bruta, que são alteradas em função das estações climáticas e da

dosagem de produtos químicos da ETA. Essa sazonalidade também foi relatada por Fiore *et al.* (2020) quando realizaram a caracterização físico-química de lodos de ETA em diferentes estações do ano.

Observou-se que, em geral, no período seco os metais Ba, Fe e Mn possuem concentrações mais elevadas do que no período chuvoso. Verificou-se que o processo de secagem térmica concentra o elemento bário em ambas as estações climáticas. No caso do ferro, apesar de apresentar uma concentração maior no período seco do que no chuvoso, para ambos os anos, houve uma redução da concentração após a secagem térmica, o que é justificado pela formação de alguns complexos voláteis evaporados junto com a fase gasosa.

4. CONCLUSÕES

A partir desse estudo de caso exploratório foi possível inferir que o processo de secagem térmica é eficaz na melhoria das características dos LETAs, pois, não altera os riscos associados a esses resíduos e gera benefícios quanto a redução da massa e densidade desses resíduos e que podem ser traduzidos como ganhos econômicos para as atividades de manejo e disposição final.

Propriedades como inflamabilidade, corrosividade e reatividade não foram observadas nas amostras de LETAs avaliadas. No entanto, se considerada a constituição dos LETAs e os requisitos legais vigentes no Brasil, se fazem necessários estudos de toxicidade complementares para a correta classificação desses resíduos. A redução da umidade após a secagem térmica, não apenas resulta em diminuição no volume total e consequente prolongando da vida útil das instalações de destinação, mas também leva a custos de transporte inferiores. Esta economia pode ser relevante, principalmente em situações que envolvem grandes volumes de LETAs.

Após a secagem térmica verificou-se o aumento do teor de sólidos e da concentração do bário e também a acidificação dos LETAs. Todavia, todos os valores permaneceram dentro dos limites estabelecidos pela norma para resíduos não perigosos. Isso é um indicador positivo da eficácia do processo de secagem térmica para o tratamento dos LETAs. Foi possível identificar o aumento da concentração dos elementos Ba, Mn e Al em extratos solubilizados do lodo após o processo de secagem, o que é justificado pela redução do teor de umidade ocorrida e que, consequentemente, gerou o aumento da concentração de sólidos. Destaca-se também que foi observada a redução na concentração do ferro, que pode ser justificada pela formação de alguns complexos voláteis evaporados junto com a fase gasosa do processo de secagem.

A caracterização microbiológica das amostras evidenciou a ausência de coliformes termotolerantes (fecais), *escherichia coli*, ovos viáveis de helmintos e *salmonella sp.* nas amostras de LETAs desidratados e secos. Entretanto, pode-se verificar que o processo de secagem promoveu uma redução significativa no teor de coliformes totais das amostras de 2022, uma vez que a secagem se dá por aproximadamente 2 horas em temperatura maior que 100°C, onde a maioria dos patógenos são inativados. Em vista disso, infere-se que o tratamento térmico avaliado é eficiente para a minimização

dos riscos biológicos, mas ocorre em temperaturas inferiores às necessárias à destruição da matéria orgânica.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 10004: Solid waste - Classification, Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 10005: Procedure for obtention leaching extract of solid wastes. Rio de Janeiro-RJ, 2004.

ABNT. NBR 1006: Procedure for the obtention of solubilized extraction of solid wastes. Rio de Janeiro-RJ, 2004.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and its Safe Disposal Options. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 950- 955. New Delhi, India: ELSEVIER. 2016. doi: 10.1016/j.proenv.2016.07.088.

ALVARENGA, J. M. C. Uso de lodo gerado em estação de tratamento de água na fabricação de bloco cerâmico ecológico para uso em construções rurais. Dissertação (Programa de Pós- Graduação em Agricultura e Ambiente) - Universidade Federal de São Carlos, Araras – SP, 2019.

AMORIM M. P. E., HURTADO G., FIORE F. A., Análise das tecnologias utilizadas para identificação da composição de LETAs, XXXVIII Congresso Interamericano Ingeniería Sanitaria y Ambiental – AIDIS. 2022.

ANDRADE C. F., SILVA C. M., OLIVEIRA F. de C. Gestão Ambiental em saneamento; uma revisão das alternativas para tratamento e disposição do lodo de ETA e seus impactos na qualidade das águas. V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Belo Horizonte/MG – 24 a 27/11/2014.

BABATUNDE, A. O., & Zhao, Y. Q. (2007). Constructive approaches toward water treatment works sludge management: An international review of beneficial reuses. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 37(2), 129–164. <https://doi.org/10.1080/10643380600776239>.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS n. 588, de 4 de maio de 2021. Altera a Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 85. p. 127, 07 de mai. de 2021.*

BOTERO, W., SANTOS, A., OLIVEIRA, L., NOVA, J. R.-Q., & 2009. Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola. *SciELO Brasil*. Retrieved November 4, 2021, from <https://www.scielo.br/j/qn/a/r5xt9hQk9FWqD6ztcyhrpfy/?lang=pt>.

BURGOS, T. DAS N., KURODA, E. K., SILVEIRA, C., SCHUROFF, P. A., LIMA, N. R. DE, LOPES, A. M., & PELAYO, J. S. Caracterização microbiológica e físico-química do lodo de decantadores das estações de tratamento de água após desaguamento em leito de drenagem com manta geotêxtil. *Revista De Ciências Da Saúde*, 17(1), 17–24. (2016). <https://doi.org/10.18764/>.

CHEN, C. W.; DONG, C. D. Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sludge from Water and Wastewater Treatment Plants by GC-MS. *Int J Environ Res Public Health*. 2019;16(14):2604. (2019) doi: 10.3390/ijerph16142604.

CREMADES, L. V., CUSIDÓ, J. A., & ARTEAGA, F. (2018). Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. *Journal of Cleaner Production*, 201, 1071–1080. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.094>.

COSENZA, J. P. DE ANDRADE, E. M., & DE ASSUNÇÃO, G. M. (2020). A circular economy as an alternative for Brazil's sustainable growth: Analysis of the national solid waste policy. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 9(1), 1–30. <https://doi.org/10.5585/GEAS.V9I1.16147>.

DE ALMEIDA, E.M., MOTA, J.D., MENEGOLLA, PIOVESAN C. M. A., MÜLLER C., ZIMMER A., ·KORF E. P., Use of sludge from the vehicle industry and its encapsulation of toxic metals in ceramic products.

Environ Sci Pollut Res **30**, 116325–116335 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30669-4>.

FIORE, F. A.; RODGHER, S.; ITO, C. Y. K.; BARDINI, V. S. S.; KLINSKY, L. M. G., Quality of surface water and generation of sludge at water treatment plants. *Rev. Ambient. Água*, vol. 15, n. 5, 2020. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2565>.

FIORE F. A., RODGHER S., ITO C. Y. K., BARDINI V. S. S., KLINSKY L. M. G., Water sludge reuse as a geotechnical component in road construction: Experimental study *Cleaner Engineering and Technology*, Volume 9, August 2022, 100512.

FURTADO, M., S., CAMELLO, N., & RODRIGUES, A. B. (2021). Residential and in Natura Water Quality Monitoring for Alternative Treatment Analysis-Amapá/Brasil. 1–18. <http://www.sustenere.co/index.php/naturalresources/article/view/8044>.

GODOY, L. G. G.; ROHDEN, A. B.; GARCEZ, M. R.; DALT, S.; GOMES, L. B. Production of supplementary cementitious material as a sustainable management strategy for water treatment sludge waste. *Case Studies Constr. Mater.* (2020), p. e0032.

GODOY, L. G. G. DE, ROHDEN, A. B., GARCEZ, M. R., COSTA, E. B. DA, DA DALT, S., & ANDRADE, J. J. DE O. (2019). Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 223, 939–950. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.333>.

GONÇALVES, F.; SOUZA, C. H. U.; TAHIRA, F. S.; FERNANDES, F.; TEIXEIRA, R. S. Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. *Revista DAE*. Ed. 205, 2017.

HASAN, M., AL BIRUNI, M., AFIA, A. AHMED T., Utilization of sludge from water treatment plant as a filler material in pavements. *J Mater Cycles Waste Manag* 24, 2656–2668 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01505-7>.

JANUARIO, G. F. and FERREIRA FILHO, S. S.. Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da Região Metropolitana de São Paulo. *Eng. Sanit. Ambient.* [online]. 2007, vol.12, n.2, pp.117-126.

LEITE L.D.P, MARTINS I.M, RODGHER S, BARDINI V.S.S, KLINSKY L.M.G, ITO C.Y.K, FIORE F.A. Microbiological composition of sludge generated in water treatment plants. *Journal of Environmental Management*, 255(Setembro 2023). <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2930>.

LOBATO, L.C.S. Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Sanitária. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MENEZES, M. P. Gerenciamento do Resíduo Sólido Oriundo de Estação de Tratamento de Água e Estudo da Disposição no Meio Ambiente. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no CEFET-GO/Área de Química para a obtenção do grau Tecnólogo em Química Agroindustrial. Goiânia, Goiás. 2006. 79 p.

RODRIGUES, D.G. Desinfecção da água por pasteurização solar (SOPAS) em comunidades rurais, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

SABESP. Dados dos sistemas produtores. Portal dos mananciais, 2023. Disponível em: <https://mananciais.sabesp.com.br/HistoricoSistemas?SistemaId=1>. Acesso em: 17 mar. 2024.

SANTOS, S. S. A.; CAMPOS, V. P. Utilização de Resíduo Sólido de Estação de Tratamento de Água (lodo), como Matéria Prima para Confecção de Elementos da Construção Civil. *Rev. Virtual Quim.*, 2018, 10 (2), 273-287.

SILVA, J. R.; MENEZES, A. C. B.; PINTO, F. A. F. Análise de eficiência da secagem térmica de lodos de estação de tratamento de águas: estudo de caso realizado na região metropolitana de São Paulo. In: 31 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITARIA E AMBIENTAL, 2021. Anais Curitiba.

SILVEIRA, C., SATIE KOGA, D., & KIYOMI KURODA, E. (2013). Estudo Da Viabilidade De Disposição Final Dos Lodos De Etas Em Aterros Sanitários. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental Da Alta Paulista*, 9(11), 251–265. <https://doi.org/10.17271/198008279112013675>.

ULLMANN, I. F.; TUNSJØ, H. S.; ANDREASSEN, M.; NIELSEN, K. M.; LUND, V.; CHARNOCK, C. Detection of aminoglycoside resistant bacteria in sludge samples from Norwegian

drinking water treatment plants (2019) *Frontiers in Microbiology*, 10 (MAR), art. no. 487. doi: 10.3389/fmicb.2019.00487.

YANG, J., REN, Y., CHEN, S., ZHANG, Z., PANG, H., WANG, X., & LU, J. (2023). Thermally activated drinking water treatment sludge as a supplementary cementitious material: Properties, pozzolanic activity and hydration characteristics. *Construction and Building Materials*, 365(October 2022), 130027. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130027>.

5. CAPÍTULO 3: LODOS DE ETAS: POTENCIAIS IMPACTOS, EFEITOS DA SECAGEM TÉRMICA E PERCOLAÇÃO DE METAIS PESADOS EM ATERROS EXCLUSIVOS, SANITÁRIOS E OBRAS GEOTÉCNICAS (MINUTA)

Espera-se que o artigo, após finalizado seja encaminhado para publicação internacional qualificada, em periódico a definir. Para além da produção científica, com este estudo de caso, espera-se contribuir com informações que subsidiem a elaboração de diretrizes associadas ao uso benéfico e à disposição final de LETAs em solo.

LODOS DE ETAS: POTENCIAIS IMPACTOS, EFEITOS DA SECAGEM TÉRMICA E PERCOLAÇÃO DE METAIS PESADOS EM ATERROS EXCLUSIVOS, SANITÁRIOS E OBRAS GEOTÉCNICAS

RESUMO

A disposição final de lodos gerados pelas Estações de Tratamento de Água (ETA) e seus impactos é uma das temáticas em evidência nas áreas de saneamento e meio ambiente. A gestão e o gerenciamento desses resíduos é um desafio ambiental em função do volume gerado, da recorrente e crescente geração, da disposição inadequada e do aterramento como rejeito em aterros sanitários. São incipientes os estudos relacionados aos impactos ambientais associados às destinações dos LETAs para fins de uso benéfico ou para aterramento. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar diferentes alternativas de disposição de LETAs em solo e aterro (desaguado, secos naturalmente e secos termicamente), que é baseada no delineamento experimental de um conjunto de ensaios estabelecidos com critérios científicos e estatísticos. Para a análise de dispersão dos poluentes em áreas de disposição de LETAs, foi construído um aparato experimental que permite a simulação das seguintes condições: disposição final de lodos em aterros exclusivos; obras geotécnicas; aterros sanitários e uma condição controle (Branco). Foram analisadas 78 amostras de percolados gerados nos reatores durante os seis meses de ensaio. Avaliou-se possíveis interferências nos resultados analíticos do líquido percolado. Durante a operação do sistema, foram a determinação do volume percolado, pH e a condutividade da água alimentada e as concentrações dos elementos (Al, Ba, Ca, Cr, Mn, Ni, Pb, Cu, Zn, Fe, Mg e K). Os reatores e condições experimentais contendo Lodo Desaguado (LD) e o Lodo Seco Termicamente apresentaram maiores concentrações para alguns metais nas amostras de percolado. Portanto, a gestão e a disposição adequada do lodo são cruciais para evitar possíveis contaminações. A comparação das concentrações de metais com os padrões estabelecidos pelas normativas ambientais (Conama 357, Conama 356 e EPA) mostrou que alguns elementos excederam os limites aceitáveis. Essa discrepância ressalta a importância de estabelecer regulamentações específicas para os resíduos gerados por esses processos, a fim de garantir a conformidade com os padrões de qualidade ambiental e de saúde pública. Portanto, estudos adicionais são necessários para avaliar os efeitos a longo prazo e a qualidade do percolado nas condições experimentais.

Palavras-Chave: Lodo de ETA; Percolação; Disposição de LETAs.

1. INTRODUÇÃO

Com a expansão da população mundial, a demanda global por água potável vem aumentando significativamente (AHMAD *et al.*, 2016). Dessa forma, os processos de purificação da água realizados nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) são etapas indispensáveis para garantir a qualidade da água e proteger a saúde humana (ZHAO *et al.*, 2018). A tecnologia mais empregada no tratamento de águas nas ETAs é o processo convencional de ciclo completo, que compreende as seguintes etapas: coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e correção de pH (BOSCOV *et al.*, 2021). De acordo com Godoy *et al.*, (2019), o processo de tratamento convencional é aplicado em 69,2% das estações de tratamento de água brasileiras. No entanto, o processo de tratamento físico-químico da água bruta produz uma quantidade significativa de lodo de ETA (LETA), cuja composição varia com a natureza da água captada, dos processos unitários e dos produtos químicos aplicados no tratamento da água (RODRIGUES & HOLANDA, 2013).

A disposição final de lodos gerados pelas ETAs e seus impactos é uma das temáticas em evidência nas áreas de saneamento e meio ambiente (JING *et al.*, 2020). Esses lodos, provenientes principalmente dos decantadores e da lavagem dos filtros no processo de tratamento, é um material composto por substâncias sólidas, orgânicas e inorgânicas, que na maioria das vezes é descartado de forma incorreta, poluindo o meio ambiente (FONSECA HERREÑO *et al.*, 2019). No Brasil, de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004) o lodo de ETA é classificado como resíduo sólido, logo deve ser tratado e disposto em conformidade com as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos, que estabelece a obrigatoriedade dos prestadores de serviços de saneamento planejarem o gerenciamento e destinar adequadamente os resíduos gerados em seus processos (BRASIL, 2010). Com base na Lista Europeia de Resíduos (2014/955/EU), de 18 de dezembro de 2014, os LETAs são considerados resíduos não perigosos e podem, portanto, ser descartados em esgotos ou aterros sanitários (HIDALGO *et al.*, 2017). No Brasil, a Instrução Normativa do Ibama nº 13, que publica a Lista Brasileira de Resíduos, também classifica o lodo de estações de tratamento de água como resíduo não perigoso (IBAMA, 2012).

A geração diária de LETAs no Brasil é da ordem de 260 a 800 mil m³ (BRASIL, 2021). Estima-se que o estado de São Paulo gere anualmente cerca de 150 mil toneladas de lodos provenientes de ETAs e que os custos associados ao manejo desses resíduos representem de 20 a 60% dos custos operacionais das unidades (GONÇALVES E SOUZA, 2017). Segundo De Carvalho *et al.* (2019), na Austrália a produção anual de lodo pode chegar a 43.500 toneladas, enquanto no Reino Unido, a quantidade anual registrada em 2014 foi em torno de 131.000 toneladas. Por outro lado, a China gera em torno de 2,3 milhões de toneladas em um ano, enquanto a Dinamarca é um dos menores geradores do mundo (ZHAO *et al.*, 2021).

A despeito do arcabouço legal, grande parte dos LETAs gerados no Brasil ainda são lançados inadequadamente em cursos d'água ou destinados como rejeitos para aterros sanitários (RODGHER

et al., 2022). Dessa forma, a gestão e o gerenciamento desses resíduos é um desafio ambiental, não apenas pelo volume gerado, mas também pelos potenciais impactos ambientais decorrentes da disposição inadequada (DE CARVALHO GOMES *et al.*, 2019). O lançamento de lodos de estação de tratamento de água (LETAs) em corpos hídricos é proibido no Brasil e, por isso, alternativas, preferencialmente contemplando usos benéficos, passaram a ser avaliadas (GONÇALVES *et al.*, 2017).

A aplicação de LETAs como substituto de matéria-prima para a construção civil é uma alternativa que vem sendo estudada e que contribui para a redução do impacto ambiental de degradação causado pela disposição irregular (GODOY *et al.*, 2019). Dentre as opções de uso benéfico desse material destaca-se: concreto pré-moldado, produção de tijolos (CREMADES *et al.*, 2018), cerâmica e cimento (DE CARVALHO GOMES *et al.*, 2019); compostagem (HIDALGO *et al.*, 2017); remoção de fósforo das águas residuais; produção agrícola e silvicultura; absorção de metais pesados (SHEN *et al.*, 2019); recuperação de coagulante (BARAKWAN *et al.*, 2020), entre outros. Dessa forma, devido à complexidade das muitas aplicações para os lodos, sugere-se que os LETAs sejam licenciados como um subproduto para cada aplicação (BOSCOV *et al.*, 2021).

Também são pesquisadas aplicações desses resíduos em solos, tais como: a aplicação direta em solos de baixa produtividade ou contaminados (HOWELLS, 2018); como elemento da construção civil em obras geotécnicas de aterros sanitários (MONTALVAN, 2016) e para a construção de bases e sub-bases de pavimentos (FIORE *et al.*, 2022). Todavia, a percolação de águas nas estruturas que contêm LETAs é um importante fator a ser considerado quando se aborda a deposição deste resíduo em solos, pois o lodo lançado no meio ambiente pode atingir cadeias tróficas sensíveis, promovendo a disseminação dos elementos presentes em sua composição, tais como Al, Cr, Cu, Fe, Mn, Zn e etc (WASSERMAN *et al.*, 2019).

Para todas as destinações supramencionadas se faz necessária a adequação do teor de umidade dos LETAs removidos dos decantadores e filtros das ETAs. Dentre os métodos de desguamento de LETAs está a secagem térmica que já é operada em escala real no Brasil, e que figura como potencial tratamento preliminar desses resíduos, pois além de adequar o teor de umidade do material para níveis desejáveis de forma rápida, também pode promover a remoção de substâncias voláteis do material, assim como microrganismos (SILVA *et al.*, 2021). Com o uso da secagem pode-se obter teores de sólidos da ordem de 90 a 95% e, com isso, reduzir significativamente a massa final dos lodos a ser destinada. O resultado desse processo é um produto de fácil manuseio, destinação e aplicabilidade (LOBATO, 2011). Para além da redução do volume, a secagem térmica melhora as condições de armazenamento, transporte e disposição final desse resíduo (YANG *et al.*, 2023).

Os estudos que avaliam a viabilidade técnica de uso dos LETAs, em geral, ainda não consideram os impactos ambientais associados às aplicações propostas (ALHMAD *et al.*, 2016). Também são incipientes os trabalhos que abordam os impactos ambientais da destinação de LETAs em solos

(WOLOWIEC *et al.*, 2019). Porém, em 2022, o estado do Rio Grande do Sul publicou uma regulamentação sobre a temática, definindo critérios e procedimentos para o uso de LETAs e seus produtos derivados em solos desse Estado. A resolução considera que o uso dos LETAs em solos é uma alternativa que apresenta vantagens econômicas e ambientais quando comparado a outras práticas de destinação final (CONSEMA, 2022). No entanto, em âmbito nacional, ainda há uma inexistência de instrumentos legais específicos que potencializam a reversão desses resíduos (SOUZA, 2017). Considerado o contexto nacional onde: estudos evidenciam a viabilidade técnica de incorporação de LETAs em solos para obras geotécnicas; as únicas destinações ambientais praticadas para os LETAs são os aterros sanitários ou exclusivos; se verifica condições legais para a aplicação de LETAs em solos; sobretudo, inexistem estudos acerca dos impactos da destinação de LETAs em solos; o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar diferentes alternativas de disposição de LETAs em solo (desaguado, seco naturalmente e seco termicamente).

2. METODOLOGIA

Esta é uma pesquisa fundamentada na metodologia científica experimental, que é baseada no delineamento de um conjunto de ensaios estabelecidos com critérios científicos e estatísticos, cujo objetivo é determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo (PAPADIMITRIOU *et al.*, 2013). Esse método apresenta como benefícios: estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos; determinação da confiabilidade dos resultados; realização da pesquisa em etapas integrativas; representação do processo estudado através de expressões matemáticas; elaboração de conclusões a partir de resultados quantitativos (MARCONI & LAKATOS, 2003). Em vista disso, realizou-se um planejamento experimental a partir da estruturação de cinco etapas integrativas e complementares, ilustradas no fluxograma mostrado na Figura 1.

Metodologia

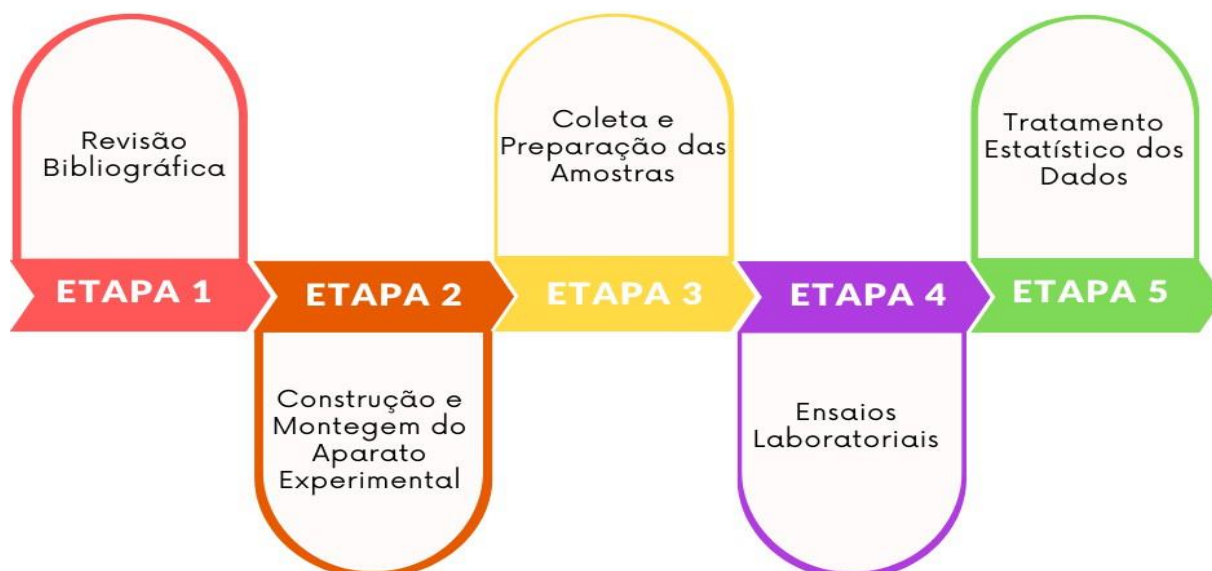


Figura 1. Fluxograma da pesquisa.

2.1. Construção e Montagem do Aparato Experimental

Para a análise de dispersão dos poluentes em áreas de disposição de LETAs, foi construído um aparato experimental, alocado no Instituto de Ciência e Tecnologia da Unesp-SJC em sala com temperatura ambiente, que foi operado e monitorado por um período de seis meses. O aparato permitiu as seguintes simulações: Condição 1: Aterros Exclusivos; Condição 2: Obras Geotécnicas (uso benéfico de LETA) e Condição 3: Aterros Sanitários (disposição final de lodos em aterros sanitários). Cada condição foi testada com 3 tipos de lodos (LD - Lodo Desaguado, LSS - Lodo Seco em Secador e LSN - Lodo Seco Naturalmente). Foram confeccionados ainda 4 reatores em condições controle (Branco – R1, R2, R3 e R4) sendo 3 para cada um dos lodos estudados e 1 reator contendo somente o solo argiloso. Ao total foram confeccionados 13 reatores em PVC, com 62 cm de altura, 30 cm de diâmetro interno e 15 mm de espessura, totalizando um volume de 44 cm³ cada reator.

Para o ensaio da Condição 1 - Aterros Exclusivos, foram separados três reatores (R5, R6 e R7) contendo respectivamente em cada reator, lodo desaguado, lodo seco do secador e lodo seco naturalmente. Além dos lodos, os reatores também foram preenchidos com camadas de solo argiloso. Na Condição 2 - Obras Geotécnicas, foram separados os reatores (R8, R9 e R10), preenchidos com uma mistura (1:1) de solo argiloso e lodo desaguado, lodo seco do secador e lodo seco naturalmente respectivamente. Já na Condição 3 - Aterros Sanitários, foram separados os reatores (R11, R12 e R13), contendo respectivamente uma mistura (1:1) de resíduos sólidos urbanos e lodo desaguado, lodo seco do secador e lodo seco naturalmente. Cabe destacar que todos os reatores receberam uma

camada base de brita para fins de proteção do sistema de percolação. A Figura 2 mostra a representação do aparato experimental construído.

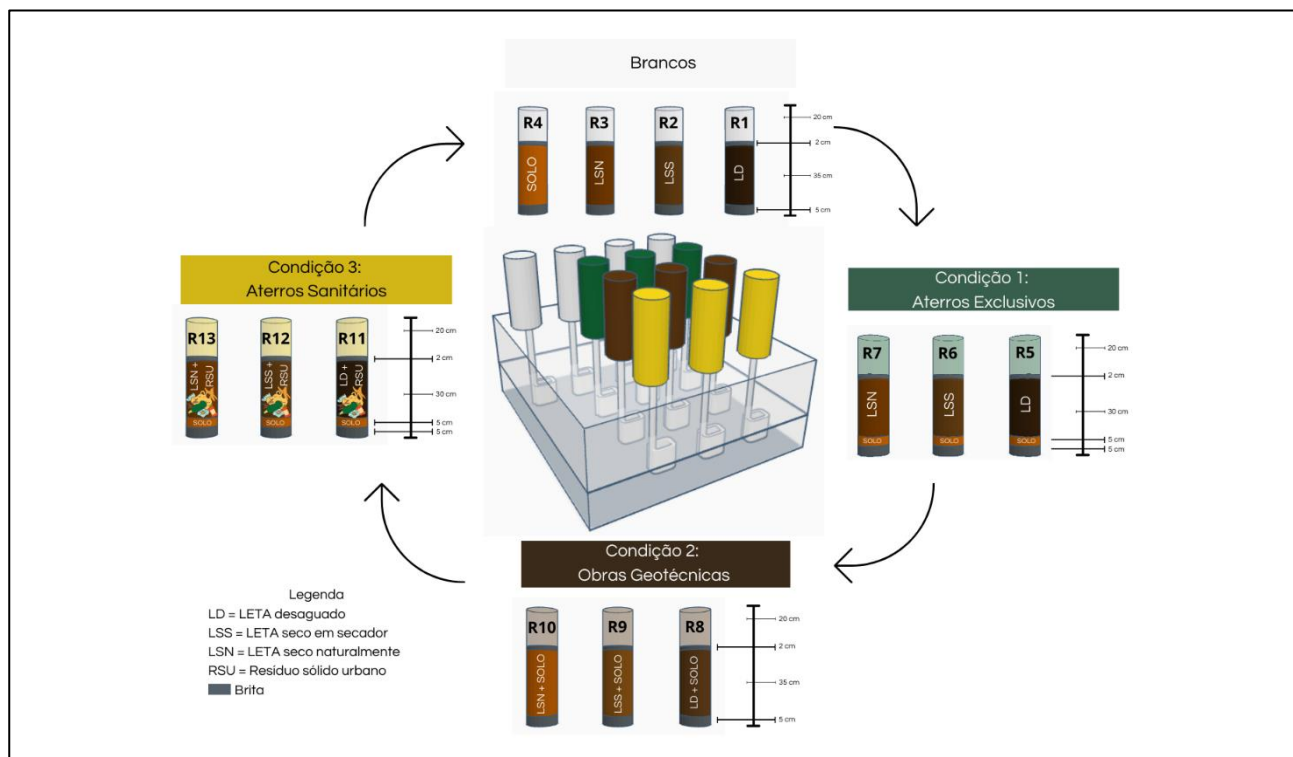


Figura 2. Aparato Experimental.

2.2. Contexto do estudo e preparação das amostras

Os ensaios realizados neste estudo utilizou como referencial uma das estações de tratamento de água localizada na região metropolitana de São Paulo (RMSP). A ETA, cujas amostras de LETAs foram utilizadas para esse estudo, capta água bruta em represa e tem capacidade produtiva de 15 m³/s. O processo de coagulação emprega sulfato de alumínio e um polímero catiônico. Nessa unidade, os resíduos gerados nos decantadores e no processo de retrolavagem dos filtros (LETAs) são encaminhados para um tanque de equalização (\cong 2% de teor de sólidos), depois para um tanque de lodo equalizado (\cong 4% de teor de sólidos) e, posteriormente para centrífugas (16% a 18% de teor de sólidos).

Na ETA estudada, após a centrifugação, o lodo é encaminhado para a seguinte etapa complementar de tratamento: secagem térmica, em sistema que utiliza uma fonte de calor para desaguamento e posterior destinação do lodo (SILVA *et al.*, 2021), ou secagem em condições naturais em pátio coberto e impermeabilizado onde ocorre reviramento mecanizado. Para a realização deste experimento, foram coletadas amostras de lodo após cada uma das três etapas do processo de tratamento de lodo (desaguamento, secagem térmica e secagem natural). As amostras de LETAs foram coletadas no início do período seco, em dia típico de operação da unidade.

Foi coletada amostra de solo argiloso, usualmente empregado em aterros e obras geotécnicas.

Também foram coletadas amostras de resíduos sólidos urbanos (RSU) destinada a aterro sanitário municipal em operação no território de implantação do aparato (São José dos Campos). A amostra de RSU foi coletada após quarteamento sequencial de resíduos oriundos da coleta convencional domiciliar, no dia da montagem dos reatores. Após as coletas, todas as amostras foram transportadas em recipientes estanques até o local de instalação do sistema e posteriormente dispostas nas colunas, conforme mostrado na Figura 2.

O sistema foi instalado visando simular a precipitação natural ocorrida no território do entorno da ETA estudada. Em vista disso, considerou-se o hidrograma unitário do município de sua localização, disponibilizado pela Sabesp por região, para o cálculo dos volumes de água a serem introduzidos no sistema e ensaio da condição inicial de disposição dos LETAs em solos. O sistema foi operado por seis meses em ambiente fechado onde manteve-se as condições ambientes de temperatura e umidade. Considerado o princípio da precaução conforme disposto por Waldman *et al.* (2017), optou-se pela simulação do período chuvoso da região, onde de acordo com a série histórica dos últimos 24 anos, possui precipitações médias mensais 175 mm para esse período (SABESP, 2023).

Os volumes mensais de águas foram introduzidos de forma parcial nas colunas, em operações semanais. O ensaio da precipitação foi realizado manualmente e buscou-se minimizar a criação de caminhos preferenciais para o percolado através da compactação dos materiais em cada reator. De modo a não introduzir novas variáveis ao sistema, foi utilizada água destilada para simulação das águas de chuva.

Todo o volume percolado das colunas foram coletados por recipientes individualizados, previamente dispostos e identificados na base da estrutura do sistema. Para garantir a confiabilidade dos resultados, as análises mensais foram realizadas a partir das amostras homogêneas do percolado de cada reator no período. Para a preservação das amostras considerou-se o disposto no Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras (Água, Sedimento, Comunidades Aquáticas e Efluentes Líquidos), da CETESB (2012).

2.3. Ensaios Laboratoriais

Os ensaios laboratoriais foram divididos em duas etapas: análises preliminares e análises realizadas durante a operação do experimento. Nas análises preliminares, foram realizadas as caracterizações dos LETAs e do solo. Durante a operação do experimento foram realizadas as caracterizações das amostras do líquido percolado, com frequência mensal.



Figura 3. Etapa Experimental.

Análises Preliminares

Para a caracterização dos materiais dispostos nas colunas, foram coletadas uma amostra representativa de cada material, considerando o disposto na NBR 10.007 (ABNT, 2004) e realizando a caracterização elementar dos LETAs e do solo para os parâmetros mostrados na Tabela 1. As análises foram realizadas por laboratório acreditado pelo INMETRO, com o uso de ICP-OES.

Tabela 1. Parâmetros e métodos analíticos utilizados para a caracterização das amostras dos lodos e solo.

| Parâmetros | Unidade | Fonte | Método |
|----------------|---------|--------------|--------|
| Alumínio Total | | | |
| Bário Total | | | |
| Cádmio Total | | | |
| Cobre Total | | | |
| Ferro Total | (mg/kg) | SW 846, 2018 | 6010D |
| Manganês Total | | | |
| Níquel Total | | | |
| Zinco Total | | | |
| Cromo Total | | | |
| Chumbo Total | | | |

Análises realizadas durante a operação do experimento

Nesta etapa, foram analisadas 78 amostras de percolados gerados nos reatores durante os seis meses de ensaio. Através desses controles, avaliou-se possíveis interferências nos resultados analíticos do líquido percolado. Outros controles realizados durante a operação do sistema, foram a determinação do volume percolado, pH, cor, turbidez e a condutividade da água alimentada em cada reator. As tabelas com todos os resultados desses parâmetros encontra-se nos apêndices.

Também foram analisados nos percolados a concentração dos elementos (Al, Ba, Ca, Cr, Mn, Ni, Pb, Cu, Zn, Fe, Mg e K), através do ICP-OES (Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente). A Tabela 2 apresenta os parâmetros, fontes e métodos analíticos adotados no presente estudo para atendimento desta etapa.

Tabela 2. Parâmetros, fontes e métodos de análise utilizados para análises das amostras de percolados.

| Parâmetros | Unidade | Fonte | Métodos |
|----------------|---------|--------------|---------|
| Alumínio Total | | | |
| Bário Total | | | |
| Cádmio Total | | | |
| Cobalto Total | | | |
| Cromo Total | | | |
| Manganês Total | | | |
| Níquel Total | mg/L | SW 846, 2018 | 6010 D |
| Chumbo Total | | | |
| Cobre Total | | | |

| | | | |
|----------------|-------|------------|---------------|
| Zinco Total | | | |
| Ferro Total | | | |
| Magnésio Total | | | |
| Potássio Total | | | |
| Cor | uC | ABNT, 1997 | NBR 13.798 |
| pH | - | ABNT, 2004 | NBR 10.004 |
| Condutividade | us/cm | ABNT, 2016 | NBR 14.340 |
| Turbidez | NTU | SMWW, 2017 | 2130 B |

2.4. Tratamento Estatístico dos Dados

Estatística Descritiva

Inicialmente realizou-se o processo de caracterização das variáveis, sendo estas traduzidas pelos resultados analíticos dos ensaios laboratoriais referentes à concentração de metais nos lodos e solos utilizados para preenchimento dos reatores. Nesta etapa, as análises com caráter descritivo empregaram métodos estatísticos simples para identificar as medidas de variabilidade de tendência central das concentrações dos metais nos reatores do aparato experimental. Essa é uma etapa fundamental para reconhecimento da distribuição estatística que descreve os valores analisados em função das condições experimentais (CASELLA; BERGER, 2010). Os dados foram registrados na ‘Tabela Variabilidade dos Parâmetros’ com estatísticas referentes ao número de repetições do ensaio por parâmetro; valores de mediana, mínimo, máximo; primeiro, segundo e terceiro quartil; elementos básicos para a construção de gráficos descritivos, disponíveis no [Material Suplementar](#). A partir disso, o pressuposto de normalidade da distribuição probabilística dos dados foi verificado para a seleção do teste de análise de variância adequado (MORETTIN; BUSSAB, 2013).

Análises Estatística

Fundamentadas na caracterização das variáveis, as análises estatísticas foram empregadas a fim de verificar as diferenças significativas entre as concentrações de metais presentes nos líquidos percolados dos reatores sob diferentes condições. A partir da realização das análises de variância, foi possível realizar comparações relativas entre a medida de tendência central de uma variável em relação às diferentes condições experimentais, e assim testar estatisticamente se as diferentes condições experimentais avaliadas e os diferentes processos de secagem de lodo alteram a concentração dos metais percolados ao longo do período de estudo (LATTIN; CARROLL; GREEN, 2011). Para todos os testes foram considerados um nível de significância de 0,05 (5%), $\alpha=5\%$ (erro tipo I) e $\beta=20\%$ (erro tipo II), sendo $1-\beta=80\%$ (poder do Teste), todos os cálculos foram realizados através do *The jamovi*

project (2021).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Construção e Montagem do Aparato Experimental

Após a construção e montagem do aparato experimental contendo 13 reatores divididos em três condições (aterro exclusivo, obras geotécnicas e aterro sanitário) e reatores referenciais (branco), iniciou-se a operação do sistema por um período de seis meses, dividido em quatro semanas, as quais simularam os meses de maior pluviometria da região estudada (janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro). Para a alimentação de água no sistema, utilizou-se água destilada, com características controladas, semanalmente, a partir da determinação dos parâmetros de pH, condutividade e volume alimentado. A Tabela 3 apresenta os resultados de condutividade e pH da água destilada de acordo com o cronograma de alimentação.

Tabela 3. Resultados de condutividade e pH da água destilada de acordo com o cronograma de alimentação.

| Mês de Ensaio | Semana | Data | Volume alimentação de água (L) | pH da água | Condutividade da água (us/cm) |
|----------------|--------|------------|--------------------------------|------------|-------------------------------|
| 1º - Outubro | 1 | 16/05/2023 | 1,80 | 5,20 | 3,22 |
| | 2 | 23/05/2023 | 1,80 | 5,84 | 1,99 |
| | 3 | 30/05/2023 | 1,80 | 4,87 | 4,79 |
| | 4 | 06/06/2023 | 1,80 | 5,21 | 7,24 |
| 2º - Novembro | 5 | 13/06/2023 | 1,85 | 5,05 | 4,38 |
| | 6 | 20/06/2023 | 1,85 | 5,75 | 2,70 |
| | 7 | 27/06/2023 | 1,85 | 5,50 | 10,96 |
| | 8 | 04/07/2023 | 1,85 | 5,62 | 5,23 |
| 3º - Dezembro | 9 | 11/07/2023 | 2,40 | 5,19 | 8,65 |
| | 10 | 18/07/2023 | 2,40 | 5,12 | 6,04 |
| | 11 | 25/07/2023 | 2,40 | 6,14 | 4,84 |
| | 12 | 01/08/2023 | 2,40 | 5,15 | 10,04 |
| 4º - Janeiro | 13 | 08/08/2023 | 3,22 | 5,89 | 8,56 |
| | 14 | 15/08/2023 | 3,22 | 5,36 | 10,97 |
| | 15 | 22/08/2023 | 3,22 | 5,11 | 16,18 |
| | 16 | 29/08/2023 | 3,22 | 4,99 | 8,68 |
| 5º - Fevereiro | 17 | 05/09/2023 | 2,84 | 5,00 | 7,67 |
| | 18 | 12/09/2023 | 2,84 | 4,99 | 5,46 |
| | 19 | 19/09/2023 | 2,84 | 5,15 | 17,07 |
| | 20 | 26/09/2023 | 2,84 | 5,14 | 5,39 |
| 6º - Março | 21 | 03/10/2023 | 2,44 | 5,16 | 6,81 |
| | 22 | 10/10/2023 | 2,44 | 5,77 | 2,17 |
| | 23 | 17/10/2023 | 2,44 | 5,10 | 4,21 |
| | 24 | 24/10/2023 | 2,44 | 5,92 | 1,76 |

3.2. Ensaio Laboratoriais

Análises Preliminares - Lodos e solo presentes nos reatores

A Tabela 4 apresenta os resultados das análises realizadas nos lodos e solo utilizados para o preenchimento de cada reator do aparato experimental construído.

Tabela 4. Resultados analíticos dos LETAs e solo utilizados no preenchimento dos reatores.

| Parâmetros | Unidade | Lodo Desidratado | Lodo Seco Naturalmente | Lodo Seco Termicamente | Solo Argiloso |
|----------------|---------|------------------|------------------------|------------------------|---------------|
| Alumínio Total | | 16.781,3 | 57.183,8 | 78.516,1 | 52.511,6 |
| Bário Total | | 12,9 | 55,0 | 191,1 | 10,6 |
| Cádmio Total | | < 0,03 | < 0,03 | < 0,03 | < 0,03 |

| | | | | | |
|----------------|-------|---------|----------|----------|----------|
| Cobre Total | mg/kg | 45,3 | 136,3 | 99,8 | 11,9 |
| Ferro Total | | 6.046,2 | 16.470,2 | 28.048,6 | 20.126,5 |
| Manganês Total | | 170,7 | 585,8 | 3.951,7 | 103,4 |
| Níquel Total | | 1,41 | 4,4 | 7,4 | 5,6 |
| Zinco Total | | 17,6 | 61,3 | 66,2 | 12,6 |
| Cromo Total | | < 0,82 | 5,45 | 6,66 | 25,64 |
| Chumbo Total | | 5,9 | 19,8 | 28,9 | 18,3 |
| Mercurio Total | | <0,0038 | < 0,0038 | < 0,0038 | < 0,0038 |

De acordo com os valores apresentados na Tabela 4, foi possível verificar que o Lodo Desaguado (LD), apresentou as menores concentrações de Al, Ni, Cr e Pb, se comparado aos demais tipos de secagem e solo argiloso. Por outro lado, o Lodo Seco Naturalmente (LSN) apresentou maior concentração de cobre total do que os demais tipos de secagem, cerca de 202% a mais se comparado ao menor valor. Além disso, a concentração de alumínio encontrada foi 8% menor do que no solo argiloso. Todavia, a maior concentração desse elemento foi observada no lodo seco termicamente, o que de acordo com SILVA *et al.*, (2021) é justificado pela concentração dos sólidos no processo de secagem. Esse fenômeno é observado também na concentração de Ba, Cu, Fe, Mn, Ni, Cr e Pb do lodo seco termicamente. No entanto, o solo argiloso apresentou menores valores para as concentrações de Ba, Cu e Mg. Apesar disso, o solo argiloso ainda apresentou a maior concentração de cromo total.

Análises dos Percolados

Avaliou-se durante o período experimental de seis meses o volume de água percolada e as características do percolado, a partir dos parâmetros: pH, condutividade, cor e turbidez de cada amostra. Verificou-se que a maior porcentagem de percolação (137%), foi observada no reator 7, durante o ensaio do mês de março. Esse reator simulou a condição de aterros exclusivos, contendo em sua composição lodo seco naturalmente. Esse valor acima de 100%, indica possíveis retenções de água durante os meses anteriores que provavelmente percolou somente nesse mês de análise. Além disso, analisou-se a concentração dos elementos (Al, Ba, Ca, Cr, Mn, Ni, Pb, Cu, Zn, Fe, Mg e K) nas amostras de percolado geradas em cada um dos 13 reatores, durante os seis meses de ensaio (janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro). Os resultados detalhados das amostras de cada reator por mês estão dispostos em documentos nos apêndices.

3.3 Tratamento Estatístico dos Dados

Estatística Descritiva

Sistematizados em tabelas de apoio no *software Excel Microsoft 365*, os dados referentes à concentração de metais nos percolados dos aparatos experimentais foram processados no *Jamovi* (v. 2.4.14). Inicialmente avaliou-se o comportamento da concentração dos metais em função do tempo, reatores e suas diferentes condições, representação nas Figuras 4a e 4b, complementares entre si.

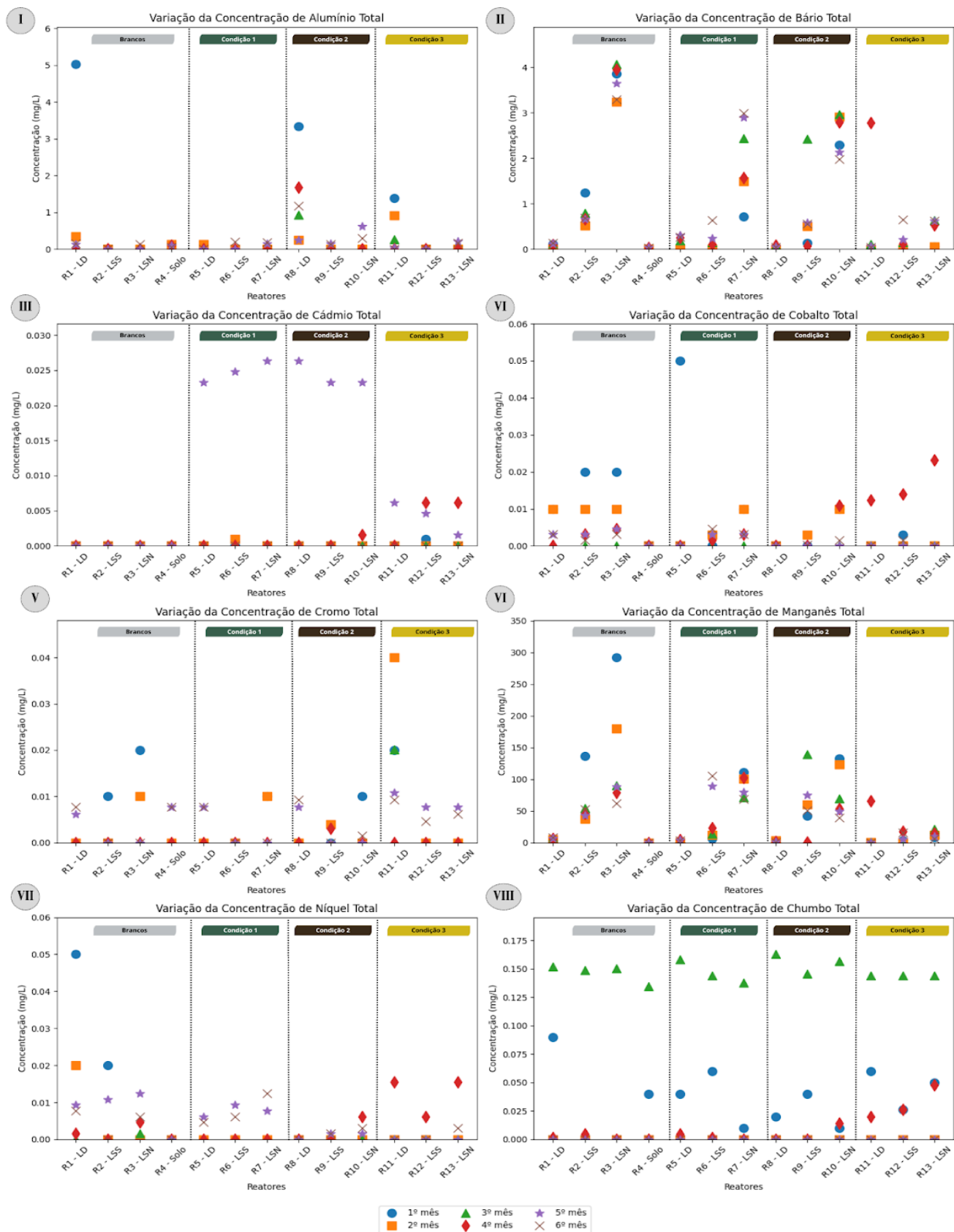


Figura 4a. Concentração dos elementos Alumínio, Bário, Cádmio, Cobalto, Cromo, Manganês, Níquel e Chumbo nos líquidos percolados.

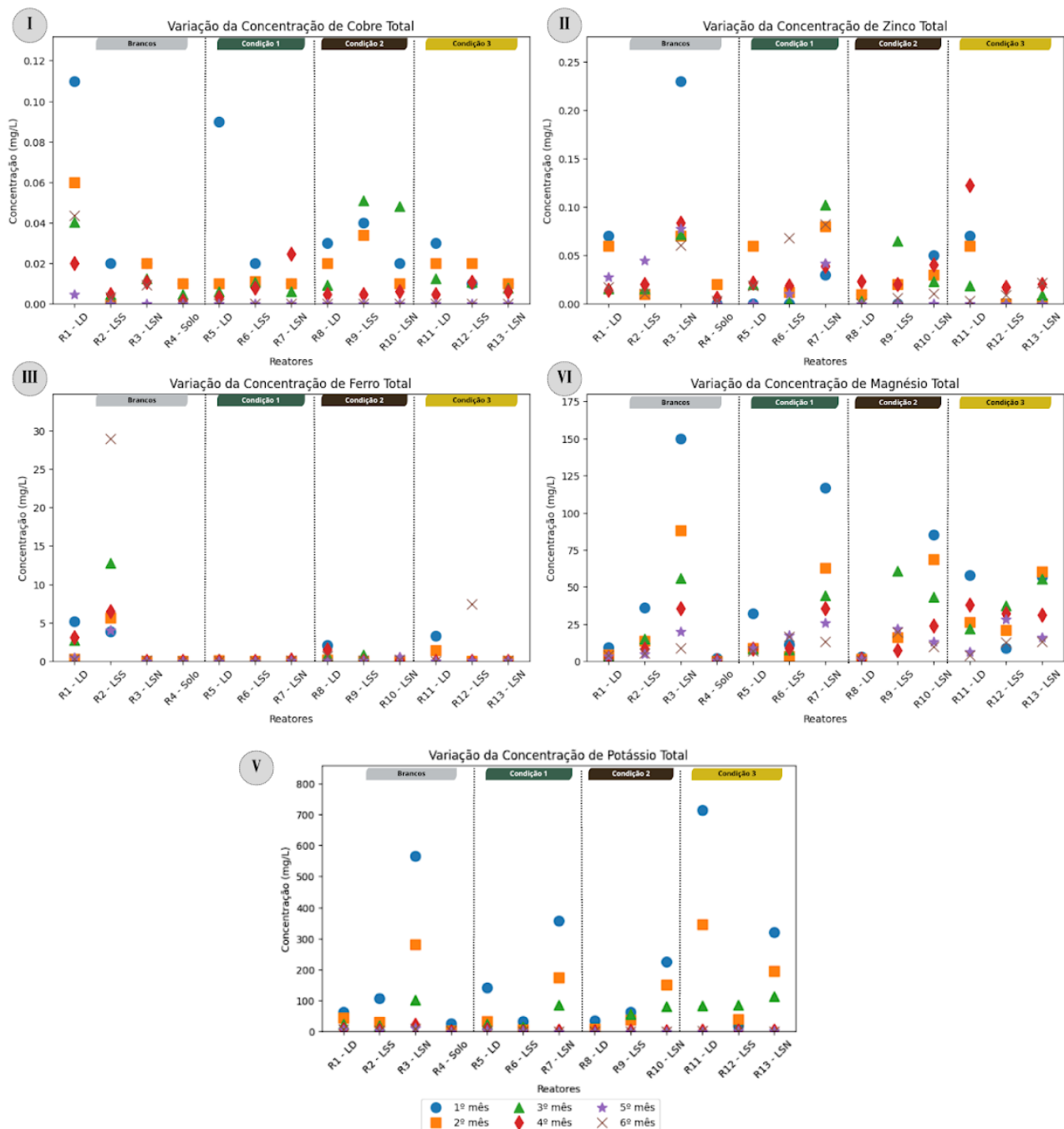


Figura 4b. Concentração dos elementos Cobre, Zinco, Ferro, Magnésio e Potássio nos líquidos percolados.

As medidas de variabilidade de tendência central foram sintetizadas por meio de *Boxplots* para facilitar a interpretação da variação dos dados, conforme destacado na Figura 4a e 4b.

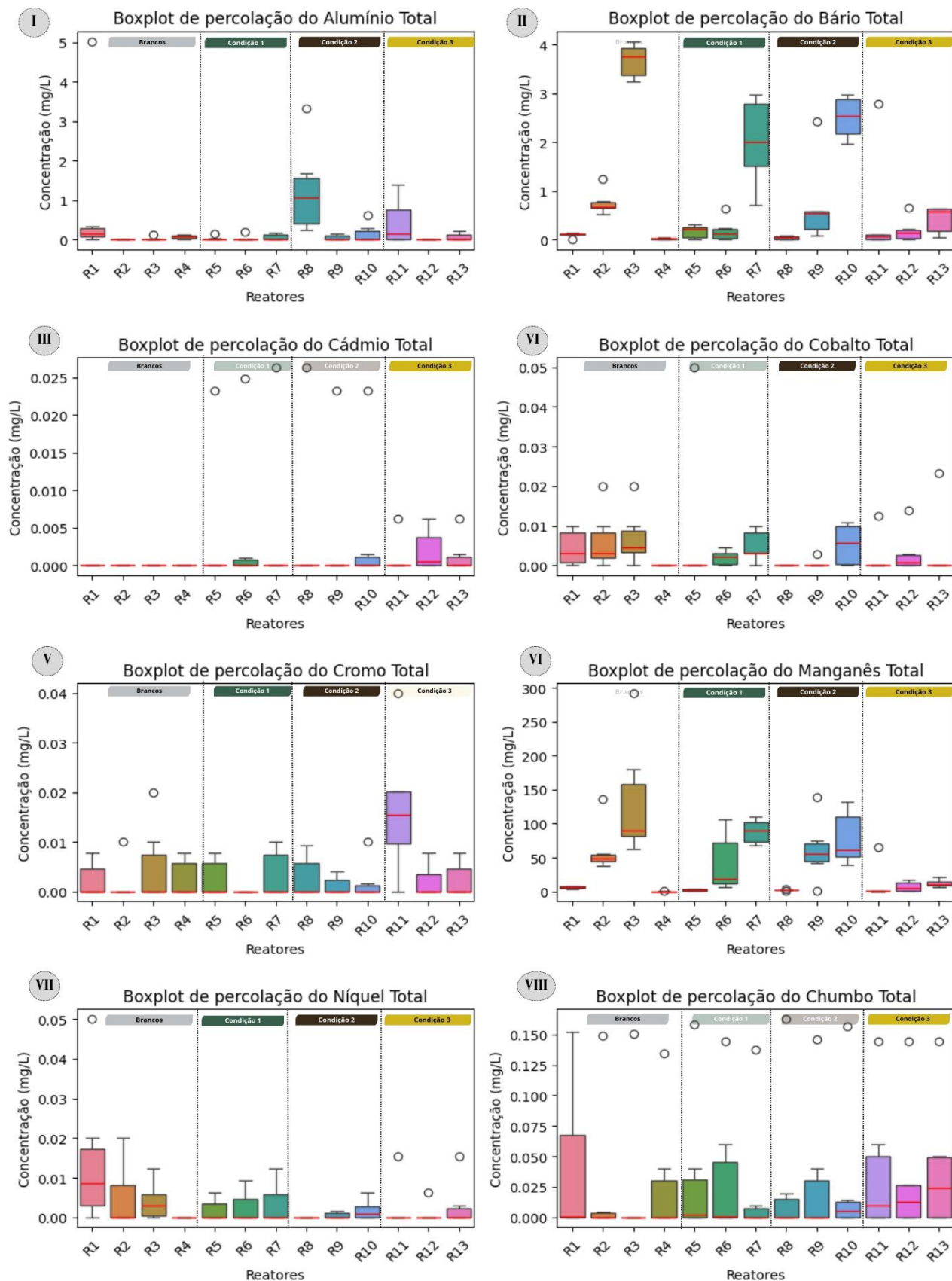


Figura 5a. Boxplot de percolação da concentração dos parâmetros: Alumínio, Bário, Cádmiu, Cobalto, Cromo, Manganês, Níquel e Chumbo.

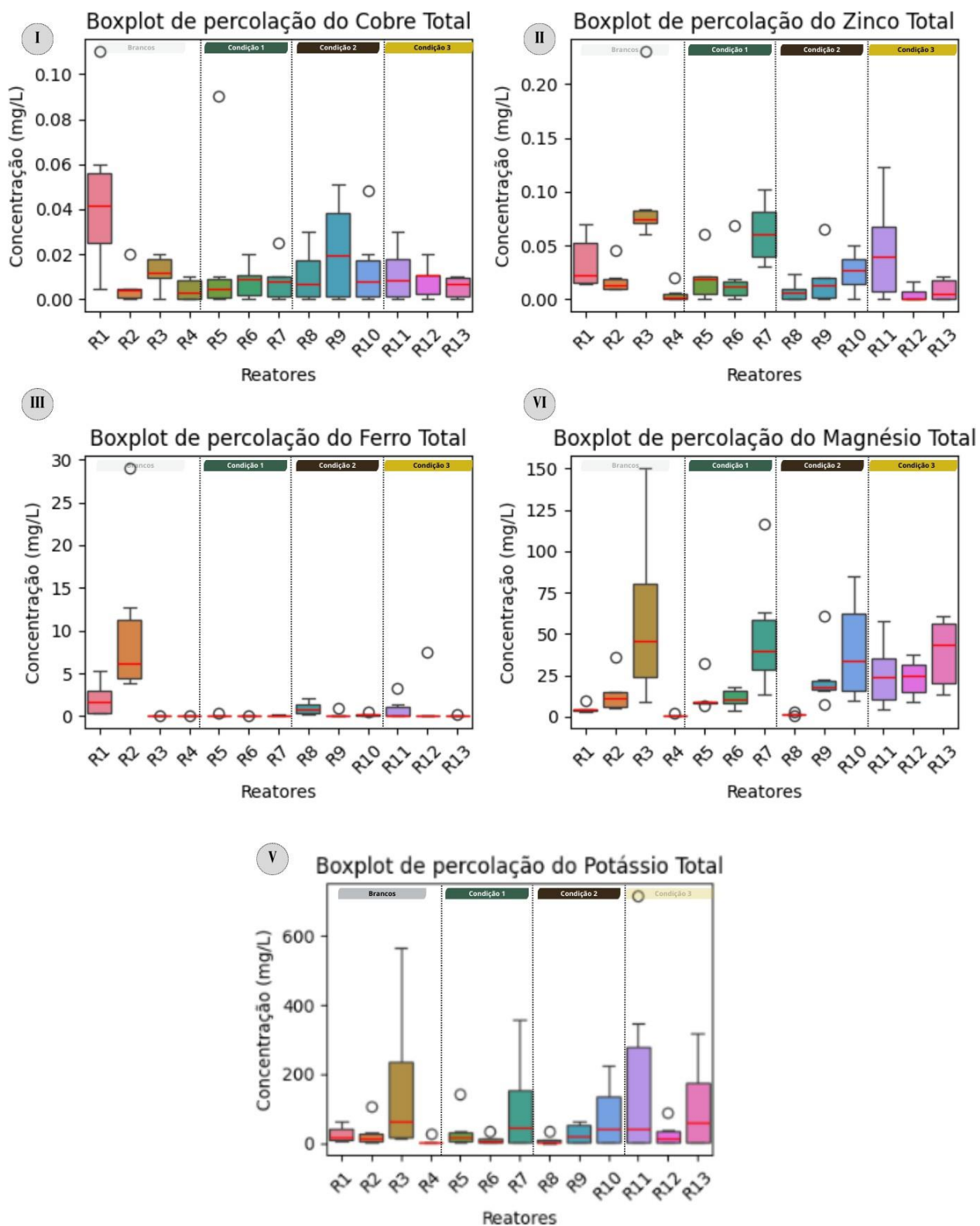


Figura 5b. Boxplot de percolação da concentração dos parâmetros: Cobre, Zinco, Ferro, Magnésio e Potássio.

Verifica-se a partir das Figuras 5a e 5b que os dados apresentaram dispersão dos valores centrais durante o período analisado nos diferentes reatores, o que indica a necessidade de realização de testes para verificação da normalidade da distribuição dos dados em função do tempo, visto que as medidas de tendência centrais podem não apresentar robustez suficiente para análise detalhada do sistema (FÁVERO; BELFIORE, 2017). Conforme usualmente adotado em testes estatísticos com número de observações (n) menor que 30, o teste de Shapiro-Wilk baseia-se no teste de hipótese para verificar o pressuposto de normalidade dos dados (HINES; MONTGOMERY; GOLDSMAN, 2000). O teste considerou como hipótese nula (H_0) a condição onde os dados são provenientes de uma distribuição normal, adotando o nível de significância $=0,05$.

Desta forma compara-se o valor p gerado (p de Shapiro-Wilk) com o nível de significância, se $p < 0,05$ há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula, o que significa que os dados de concentração de metais nos diferentes reatores e tipos de lodo, não são consistentes com uma distribuição normal (MORTETTIN; BUSSAB, 2013). Os resultados do teste de normalidade, aplicado separadamente a cada metal em função do tempo e reator, estão disponíveis na Tabela 5, que indica em vermelho os resultados em que o valor p foi menor que o nível de significância adotado, enquanto os valores destacados em verde referem-se aos resultados de p maior que o nível de significância. Em vista disto, pode-se verificar os metais que atendem ou não o pressuposto de normalidade.

Tabela 5. Resultados do teste de *Shapiro-Wilk* por parâmetro durante os meses de análise por reator.

| <i>p</i> de <i>Shapiro-Wilk</i> por parâmetro | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------|----------------|-----------------|------------------|----------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|
| Reator | Alumínio Total | Bário Total | Cádmio Total | Cobalto Total | Cromo Total | Manganês Total | Níquel Total | Chumbo Total | Cobre Total | Zinco Total | Ferro Total | Magnésio Total | Potássio Total |
| R1 | 0,0001 | 0,0083 | - | 0,0783 | 0,0042 | 0,735 | 0,067 | 0,0081 | 0,619 | 0,0657 | 0,191 | 0,0172 | 0,108 |
| R2 | - | 0,0672 | - | 0,0824 | 0 | 0,0022 | 0,0069 | 0 | 0,0145 | 0,011 | 0,0163 | 0,0578 | 0,008 |
| R3 | 0 | 0,403 | - | 0,205 | 0,0064 | 0,0488 | 0,256 | 0 | 0,449 | 0,0007 | 0,0022 | 0,434 | 0,0433 |
| R4 | 0,525 | 0,519 | - | - | 0,0014 | 0,101 | - | 0,0019 | 0,0977 | 0,0113 | 0,0005 | 0,0004 | 0,0011 |
| R5 | 0,0003 | 0,0996 | 0 | 0 | 0,0014 | 0,251 | 0,0051 | 0,0017 | 0,0004 | 0,118 | 0,0063 | 0,0002 | 0,004 |
| R6 | 0 | 0,076 | 0 | 0,456 | - | 0,0382 | 0,0065 | 0,0053 | 0,444 | 0,0167 | 0 | 0,673 | 0,0366 |
| R7 | 0,0035 | 0,492 | 0 | 0,082 | 0,0014 | 0,342 | 0,0069 | 0,0001 | 0,217 | 0,319 | 0,173 | 0,311 | 0,0638 |
| R8 | 0,248 | 0,264 | 0 | - | 0,0036 | 0,803 | - | 0,0002 | 0,278 | 0,19 | 0,394 | 0,19 | 0,0073 |
| R9 | 0,0164 | 0,0091 | 0 | 0,0001 | 0,0047 | 0,687 | 0,0014 | 0,0015 | 0,14 | 0,0461 | 0,0003 | 0,0165 | 0,0846 |
| R10 | 0,0059 | 0,244 | 0,0001 | 0,027 | 0,0003 | 0,131 | 0,0703 | 0,0002 | 0,081 | 0,97 | 0,141 | 0,42 | 0,12 |
| R11 | 0,0596 | 0,0001 | 0 | 0 | 0,633 | 0 | 0 | 0,0225 | 0,384 | 0,397 | 0,0108 | 0,666 | 0,0239 |
| R12 | - | 0,0529 | 0,0301 | 0,0026 | 0,007 | 0,101 | 0 | 0,0027 | 0,272 | 0,0069 | 0 | 0,778 | 0,0442 |
| R13 | 0,004 | 0,0087 | 0,0012 | 0 | 0,0042 | 0,52 | 0,0006 | 0,0375 | 0,099 | 0,0492 | 0,0067 | 0,134 | 0,129 |

Legenda:

R1, R2, R3, R4: brancos

R5, R6 e R7: aterros exclusivos - condição 1

R8, R9, R10: obras geotécnicas - condição 2

R11: aterros sanitários - condição 3

Análises Estatísticas

Considerando que entre as concentrações dos metais em função dos reatores há diferentes distribuições dos dados, adotou-se o teste estatístico *Kruskal-Wallis*, uma versão não paramétrica da análise de variância (ANOVA). Este teste foi utilizado devido à não-normalidade dos dados, não pareados, que não atenderam aos pressupostos da ANOVA (HINES; MONTGOMERY; GOLDSMAN, 2000). A realização deste mostrou-se aderente à proposta de realizar comparações relativas entre as medidas de tendência central das variáveis dependentes sendo a concentração dos metais percolados, em relação às variáveis independentes, diferentes condições experimentais presentes nos treze reatores. Desta forma foi possível testar estatisticamente o comportamento da concentração dos metais nos diferentes processos de secagem de lodo e nas condições experimentais criadas no período de estudo (LATTIN; CARROLL; GREEN, 2011), conforme destacado na Tabela 6.

Tabela 6. Resultado do teste de *Kruskal-Wallis* em termos do *valor-p*.

| Parâmetro | χ^2 | Valor-p |
|-----------------------|--------------|----------------|
| Alumínio Total | 35.46 | 3.95e-4 |
| Bário Total | 55.79 | 1.30e-7 |
| Cádmio Total | 10.75 | 5.508 |
| Cobalto Total | 26.14 | 103 |
| Cromo Total | 16.01 | 1.906 |
| Manganês Total | 59.52 | 2.76e-8 |
| Níquel Total | 18.04 | 1.146 |
| Chumbo Total | 2.56 | 9.979 |
| Cobre Total | 13.63 | 3.251 |
| Zinco Total | 38.15 | 1.45e-4 |
| Ferro Total | 42.76 | 2.48e-5 |
| Magnésio Total | 52.01 | 6.17e-7 |
| Potássio Total | 12.61 | 3.979 |

A partir do nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), verifica-se se há diferenças estatisticamente significativas para as concentrações dos metais Al, Ba, Co, Mn, Zn, Fe e Mg nos percolados entre os diferentes reatores, uma vez que todos apresentam valor menor que o nível de significância ($p < 0,05$). Isto indica que pelo menos um dos treze reatores têm uma concentração mediana significativamente diferente dos outros para os metais em questão.

Observa-se ainda que os metais Ba, Mn e Mg destacam maiores diferenças estatisticamente significativas em comparação com os demais, fator observado pelo valor representado por X^2 , que indica a magnitude da diferença entre os grupos comparados, quanto maior for o valor de X^2 , maior será a evidência de que há diferenças significativas entre os grupos (HINES; MONTGOMERY; GOLDSMAN, 2000).

A comparação entre os reatores (múltiplas comparações), foi realizada através do teste *post hoc* de *Tukey*. Este teste retornou a partir comparação por pares dos reatores as diferenças estatisticamente significativas (valores $p < \alpha = 0,05$) entre eles, a partir das diferenças na concentração dos metais percolados denotados pelo teste de *Kruskal-Wallis*. Desta forma, a Tabela 7 indica por meio de uma matriz de interação quais reatores possuem diferenças significativas entre eles e por quais metais esta diferença é verificada. Os dados brutos do teste *Tukey* estão disponíveis no [Material Suplementar](#).

Tabela 7. Matriz de interação para diferenças estatisticamente significativas entre os reatores.

| R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 | R10 | R11 | R12 | R13 |
|-----|--------|----|--------|----|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| R1 | Ba, Mn | | | | Fe | Ba, Mn, Zn, Mg | | | | Ba, Mn, Mg | | |
| R2 | | Ba | Ba, Mn | Ba | Ba, Fe | Ba, Zn | Ba, Mn | Ba, Mn | Ba | Ba | Ba, Mn | Ba |
| R3 | | | | | Fe | Ba, Mn | | | | Ba, Mn | | |
| R4 | | | | | Fe | Ba, Mn, Zn | | | | Ba, Mn, Zn | | |
| R5 | | | | | | Ba, Mn, Zn, Fe | Fe | Fe | Fe | Ba, Mn, Fe | Fe | Fe |
| R6 | | | | | | Ba, Mn, Zn, Mg | | | | Ba | | |
| R7 | | | | | | | Ba, Mn, Zn, Mg | Ba, Mn, Zn, Mg | Ba, Mn, Zn, Mg | Ba | Ba, Mn, Zn, Mg | Ba, Mn, Zn |
| R8 | | | | | | | | | | Ba, Mn, Zn, Mg | | |
| R9 | | | | | | | | | | Ba, Mn | | |
| R10 | | | | | | | | | | Ba | | |
| R11 | | | | | | | | | | | Ba, Mn, Mg | Ba |

Legenda:

R1, R2, R3, R4: brancos

R5, R6 e R7: aterros exclusivos - condição 1

R8, R9, R10: obras geotécnicas - condição 2

R11: aterros sanitários - condição 3

A partir da matriz de interação para diferenças estatisticamente significativas entre os reatores evidenciada pela concentração de metais no percolado, a partir da Tabela 8 é possível verificar quais as diferenças entre as condições experimentais e os processos de secagem do lodo.

Tabela 8. Matriz de interação diferenças estatisticamente significativas entre os tipos de secagem de lodo e condições experimentais.

| Condição | Tipo de secagem do lodo | Branco | | | | Condição 1 | | | Condição 2 | | | Condição 3 | | |
|------------|-------------------------|--------|-----|-----|------|------------|-----|-----|------------|-----|-----|------------|-----|-----|
| | | LD | LSS | LSN | Solo | LD | LSS | LSN | LD | LSS | LSN | LD | LSS | LSN |
| Branco | LD | | x | | | | x | x | | | | x | | |
| | LSS | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | LSN | | | | | | x | x | | | | x | | |
| | Solo | | | | | | x | x | | | | x | | |
| Condição 1 | LD | | | | | | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | LSS | | | | | | x | | | | | x | | |
| | LSN | | | | | | | | x | x | x | x | x | x |
| Condição 2 | LD | | | | | | | | | | | x | | |
| | LSS | | | | | | | | | | | x | | |
| | LSN | | | | | | | | | | | x | | |
| Condição 3 | LD | | | | | | | | | | | x | x | |

Legenda:

LD: Lodo desaguado

LSS: Lodo seco com secador

LSN: Lodo seco naturalmente

A Tabela 8 indica as diferenças estatisticamente significativas entre as condições experimentais e os tipos de secagem de lodo. As células preenchidas com 'x' indicam situação onde os tipos de secagem de lodos apresentam diferenças significativas entre as os tipos de secagem e/ou condições experimentais, ao passo que as células também preenchidas e com destaque na cor cinza, destacam a situação onde o mesmo tipo de secagem de lodo apresenta diferença estatisticamente entre as condições. Diante do exposto, ressalta-se que as diferenças estatísticas verificadas por meio dos testes são evidências suficientes para afirmar que as condições operacionais e o tipo de secagem de lodo influenciam na concentração dos metais nos percolados.

Ao comparar a Condição Controle (R1 a R4) com as demais, verifica-se diferenças significativas nas concentrações dos metais Ba, Mn, Fe, Mg e Zn. Na Condição Controle, o Lodo Desaguado (LD) do R1 apresenta diferença estatisticamente significativa em relação ao mesmo processo de secagem de

lodo presente no R11 em termos dos metais Ba, Mn e Mg. Ao verificar o *Boxplot* II e VI da Figura 5a e o *Boxplot* VI da Figura 5b, pode-se afirmar que os metais Ba e Mn apresentam a mediana da distribuição das concentrações é brevemente maior no R1 do que no R11, ao passo que para o metal Mg o comportamento é oposto ao anterior. Já para o R2, respectivo ao Lodo Seco em Secador (LSS), as diferenças concentram-se nos metais Ba, Fe e Mn nos reatores R6, R9 e R12 com o mesmo processo de secagem, baseado nos *Boxplots*, verifica-se que o R2 tem concentração maior em termos de Ba e Fe do que os demais, enquanto o R12 apresenta maior concentração de Mg. Por fim, os reatores R3 e R4 apresentaram diferenças significativas somente entre as condições experimentais. Em se tratando da Condição 1: Aterros Exclusivos (R5 a R7), nota-se diferenças significativas nas concentrações dos metais Ba, Mn e Fe no percolado do R5 (LD) em relação ao R8 e R11 (Obras Geotécnicas e Aterros Sanitários, respectivamente), ambos com o mesmo processo de secagem. A partir do *Boxplot* II e VI da Figura 5a e o *Boxplot* III da Figura 5b, pode-se afirmar que o R5 é maior na distribuição da concentração de Ba quando comparado aos outros reatores de mesmo processo, sendo maior no R8 em termo de Fe. Para o R6 (LSS), as diferenças são em relação ao R7 (LSN) e R11 (LD), denotados por Ba, Mn, Zn e Mg, pelos *Boxplots* II e VI Figura 5a e *Boxplots* II e IV Figura 5b, verifica-se que o R7 (LSN) tem maior concentração de metais que os demais.

Para a Condição 2: Obras Geotécnicas (R8 a R10), as diferenças significativas nas concentrações dos metais Ba, Mn, Zn e Mg no percolado do R8 (LD), do R9 (LSS) os metais Ba e Mn, e para o R10 (LSN) somente para Ba, todos os três reatores em relação ao R11 (LD). Pelo pelos *Boxplots* II e VI - Figura 5a e *Boxplots* II e IV - Figura 5b, verifica-se que a concentração de Ba, Mn e Mg no R10 (LSN) é maior que os demais, e para o metal Zn maior no R11 (LD).

Por fim, a Condição 3 (R11 a R13), as concentrações estatisticamente significativas estão nos metais Ba, Mn e Mg, entre os reatores R11 (LD), R12 (LSS) e R13 (LSN), pelos *Boxplots* II e VI Figura 5a e *Boxplot* IV da Figura 5b, sendo que no R13 a concentração de Ba, Mn e Mg é maior que nos demais. As diferenças estão evidenciadas entre os diferentes tipos de secagem de lodo, neste caso.

Os resultados obtidos revelam insights importantes sobre a influência das condições operacionais e do tipo de secagem de lodo na concentração dos metais presentes nos percolados. Os metais mais recorrentes nos percolados foram o Ba, Mn, Fe, Mg e Zn. Em relação às condições de secagem de lodo com as maiores concentrações de metais, identificou-se que o Lodo Desaguado (LD) apresentou diferenças significativas, especialmente nos reatores R1, R5 e R8, todos de diferentes condições. Além disso, as análises indicaram que a Condição Controle (R1 a R4) apresentou diferenças estatisticamente significativas em comparação com as outras condições, especialmente no reator R1 destacando-se como o mais frequente.

Desta forma, os resultados sugerem que a Condição 3 (R11 a R13), permite um maior arraste através da percolação quando comparado às demais condições, visto que apresentou as maiores concentrações de metais nos percolados, especialmente o Ba, Mn e Mg. Quanto aos tipos de secagem, tanto o Lodo Desaguado (LD) quanto o Lodo Seco em Secador (LSS) demonstraram-se mais eficazes,

destacando-se este último em relação ao metal Mg. Essas descobertas fornecem uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias de gestão de resíduos mais eficazes e ambientalmente sustentáveis.

Para além do comportamento das concentrações dos metais entre os diferentes tipos de secagem e condições experimentais criadas, comparou-se os valores médios das concentrações no período estudado com as normativas Conama 357, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento; Conama 356, que traz padrões para águas subterrâneas e EPA, que estabelece critérios de água para saúde humana e dos organismos aquáticos. Esse comparativo está apresentado na Tabela 9.

Dessa forma, foi possível verificar que o parâmetro alumínio teve concentração acima do limite estabelecido pelo Conama 357 no R1 (LD – Branco) e R11 (LD- Aterro Sanitário). No R8 (LD – Obras Geotécnicas), o valor ficou acima do limite estabelecido pelo Conama 357 e 356. Apesar do Bário, verificou-se que o valor excedeu o limite dos Conamas e EPA no R3 (LSN – Branco) e no R10 (LSN – Obras Geotécnicas). Os metais cádmio, cobalto, cromo, níquel e zinco, não apresentaram valores acima de nenhuma das normativas. Já para o manganês, as concentrações excederam todas as normativas em 12 dos 13 reatores, somente o R4 (Solo Argiloso – Condição Controle) ficou dentro dos limites. Ou seja, esse elemento já possui uma alta concentração nos lodos e houve o arraste do mesmo para as amostras de percolado. As concentrações de cobre atenderam a todas as normativas somente nos reatores R2 (LSS- Branco), R4 (Solo – Branco) e R5 (LD – Condição 1). Já para o ferro as concentrações acima dos Conamas, foram identificadas nos reatores R1 (LD - Branco), R2 (LSS - Branco) e R8 (LD – Condição 2). Além disso, nenhuma das normativas traz valores limites para os parâmetros magnésio e potássio.

Verificou-se que alguns elementos possuem concentrações elevadas na composição dos LETAs e isso está diretamente relacionado com as características das águas captadas nos mananciais, com os produtos químicos dosados na ETA e também com o processo de secagem e condicionamento adotado para o desaguamento dos LETAs. Todavia, se fazem necessários estudos longitudinais específicos que auxiliem na equiparação desses resultados de comportamento e que permitam a inferência da composição dos lodos a partir desses elementos.

Tabela 9. Comparação mediana da concentração dos metais com normativas nacionais.

| Parâmetro | Un. | Conama 357 - Águas Classe I e II | Conama 356 - Água de Subterrâneas | EPA - Critérios Água para Saúde Humana + Organismos | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 | R10 | R11 | R12 | R13 |
|-----------------------|------|--|---|--|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Alumínio Total | mg/L | 0,10 | 0,20 | - | 0,14 | 0 | 0 | 0,08 | 0 | 0 | 0 | 1,05 | 0,01 | 0 | 0,15 | 0 | 0 |
| Bário Total | mg/L | 0,70 | 0,70 | 1,00 | 0,11 | 0,68 | 3,75 | 0,02 | 0,22 | 0,12 | 2 | 0,05 | 0,53 | 2,54 | 0,06 | 0,13 | 0,58 |
| Cádmio Total | mg/L | 0,001 | 0,005 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Cobalto Total | mg/L | 0,05 | - | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0 | 0 |
| Cromo Total | mg/L | 0,05 | 0,05 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,02 | 0 | 0 |
| Manganês Total | mg/L | 0,10 | 0,10 | 0,05 | 6,4 | 48,98 | 89,29 | 0,08 | 2,76 | 18,44 | 90,13 | 1,8 | 55,26 | 61,6 | 0,41 | 4,32 | 11,06 |
| Níquel Total | mg/L | 0,025 | 0,02 | 0,61 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Chumbo Total | mg/L | 0,01 | 0,01 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| Cobre Total | mg/L | 0,009 | 2,00 | 1,30 | 0,04 | 0 | 0,01 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Zinco Total | mg/L | 0,18 | 5,00 | 7,40 | 0,02 | 0,01 | 0,07 | 0 | 0,02 | 0,01 | 0,06 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,04 | 0 | 0 |
| Ferro Total | mg/L | 0,30 | 0,30 | - | 1,64 | 6,11 | 0 | 0 | 0,02 | 0 | 0,07 | 0,74 | 0,04 | 0,14 | 0,11 | 0 | 0 |
| Magnésio Total | mg/L | - | - | - | 4,08 | 11,11 | 45,87 | 0,45 | 8,71 | 10,16 | 39,87 | 1,59 | 18,06 | 33,64 | 24,3 | 24,66 | 43,49 |
| Potássio Total | mg/L | - | - | - | 15,82 | 12,37 | 61,71 | 3 | 15,16 | 5,58 | 44,21 | 2,93 | 20,64 | 41,67 | 42,85 | 11,09 | 59,35 |

4. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que tanto as condições operacionais quanto o tipo de secagem de lodo exercem influência significativa na concentração de metais dos percolados. Isso evidencia que as simulações foram capazes de representar adequadamente as diferentes condições de disposição de LETAs em solos.

Nas simulações avaliadas, os metais mais frequentemente encontrados em concentrações elevadas nos percolados foram: bário, manganês, ferro, magnésio e zinco e esses devem ser destacados como potenciais riscos à qualidade ambiental e a saúde humana. Observou-se que as condições experimentais contendo Lodo Desaguado (LD) e o Lodo Seco Termicamente apresentaram maiores concentrações para alguns metais nas amostras de percolado. Considerado o fato de que os LETAs atualmente são encaminhados em ambas as condições para disposição final em aterros, a operação adequada dessas unidades é crucial para evitar possíveis contaminações.

A comparação das concentrações de metais presentes nos percolados com os padrões estabelecidos pelas normativas ambientais (Conama 357, Conama 356 e EPA) revela que, em média, alguns elementos (Al, Fe, Ba, Mn e Cu) excedem os referenciais de qualidade estabelecidos. No entanto, destaca-se que os referenciais utilizados são mais restritivos do que aqueles aplicáveis para efluentes tratados e que outras equiparações serão realizadas antes da publicação dos resultados dessa pesquisa.

Estudos adicionais são necessários para avaliar os efeitos de longo prazo das características dos percolados nas condições experimentais. Destaca-se que os reatores continuaram em operação, por meio de pesquisa complementar, para que o experimento representasse todo o ano hidrológico e publicação deve incorporar os dados complementares gerados também no período de seca.

Espera-se que o trabalho contribua para a ampliação do conhecimento acerca dos potenciais impactos das condições operacionais e dos diferentes processos de secagem de lodo e, sobretudo, para garantir a implementação de práticas mais sustentáveis na gestão desses resíduos.

5. APÊNDICES

Tabela 10. Parâmetro físico-químicos dos percolados por reatores.

| Reator | Mês de ensaio | Volume de água alimentado (L) | Volume de água percolada (L) | Porcentagem de percolação (%) | pH | Condutividade ($\mu\text{s cm}^{-1}$) | Cor (uC) | Turbidez (NTU) |
|--------|---------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------|---|----------|----------------|
| 1 | Outubro | 7,20 | 1,69 | 23,50 | 7,73 | 872,30 | 520,00 | 74,50 |
| 2 | | 7,20 | 1,91 | 26,50 | 7,77 | 897,30 | 493,00 | 33,80 |
| 3 | | 7,20 | 3,30 | 45,80 | 6,55 | 869,60 | 31,60 | 8,00 |
| 4 | | 7,20 | 2,74 | 38,10 | 7,43 | 77,40 | 5,30 | 0,50 |
| 5 | | 7,20 | 0,54 | 7,50 | 7,87 | 731,70 | 19,10 | 1,60 |
| 6 | | 7,20 | 4,29 | 59,60 | 7,47 | 528,00 | 28,70 | 2,50 |
| 7 | | 7,20 | 2,58 | 35,80 | 6,75 | 861,30 | 14,10 | 6,30 |
| 8 | | 7,20 | 7,40 | 102,80 | 6,97 | 463,70 | 139,00 | 26,50 |
| 9 | | 7,20 | 2,64 | 36,70 | 6,89 | 588,60 | 101,30 | 6,50 |
| 10 | | 7,20 | 3,01 | 41,70 | 6,70 | 1068,00 | 29,00 | 9,60 |
| 11 | | 7,20 | 5,43 | 75,40 | 7,54 | 1013,00 | 287,00 | 29,20 |
| 12 | | 7,20 | 1,18 | 16,40 | 8,10 | 547,90 | 15,20 | 1,30 |
| 13 | | 7,20 | 3,43 | 47,60 | 7,33 | 1045,00 | 28,10 | 3,20 |
| 1 | Novembro | 7,40 | 2,19 | 29,60 | 8,01 | 1482,00 | 298,00 | 32,57 |
| 2 | | 7,40 | 3,56 | 48,10 | 7,34 | 806,70 | 488,70 | 26,53 |
| 3 | | 7,40 | 4,70 | 63,50 | 6,99 | 1368,00 | 23,40 | 1,98 |
| 4 | | 7,40 | 6,48 | 87,60 | 7,71 | 71,90 | 10,00 | 0,44 |
| 5 | | 7,40 | 6,69 | 90,40 | 7,76 | 816,60 | 15,20 | 1,08 |
| 6 | | 7,40 | 5,40 | 73,00 | 7,77 | 544,80 | 36,80 | 2,80 |
| 7 | | 7,40 | 6,62 | 89,50 | 7,08 | 1194,00 | 12,50 | 0,71 |
| 8 | | 7,40 | 7,03 | 95,00 | 5,13 | 219,80 | 21,40 | 1,58 |
| 9 | | 7,40 | 4,81 | 65,00 | 6,87 | 1216,00 | 209,00 | 16,00 |
| 10 | | 7,40 | 4,86 | 65,70 | 7,11 | 1222,00 | 22,80 | 1,34 |
| 11 | | 7,40 | 3,19 | 43,10 | 8,13 | 1385,00 | 304,70 | 61,63 |
| 12 | | 7,40 | 6,97 | 94,20 | 7,89 | 965,90 | 21,70 | 0,53 |
| 13 | | 7,40 | 7,05 | 95,30 | 7,38 | 1283,00 | 36,80 | 3,52 |

| | | | | | | | | |
|----|-----------|-------|-------|--------|------|---------|--------|-------|
| 1 | | 9,60 | 1,86 | 24,10 | 6,99 | 798,00 | 432,00 | 62,30 |
| 2 | | 9,60 | 2,45 | 33,90 | 7,15 | 806,70 | 513,00 | 34,20 |
| 3 | | 9,60 | 3,12 | 43,20 | 7,03 | 1203,00 | 32,40 | 5,40 |
| 4 | | 9,60 | 4,48 | 62,10 | 8,02 | 86,40 | 13,20 | 0,56 |
| 5 | | 9,60 | 5,49 | 23,40 | 7,96 | 826,40 | 20,10 | 1,32 |
| 6 | | 9,60 | 3,58 | 48,90 | 7,55 | 563,00 | 32,40 | 3,10 |
| 7 | Dezembro | 9,60 | 3,85 | 52,30 | 6,98 | 996,00 | 15,40 | 3,20 |
| 8 | | 9,60 | 6,98 | 98,30 | 7,01 | 456,30 | 44,30 | 5,63 |
| 9 | | 9,60 | 3,22 | 45,30 | 6,75 | 876,00 | 149,30 | 17,30 |
| 10 | | 9,60 | 2,85 | 42,20 | 7,02 | 1045,00 | 26,70 | 8,30 |
| 11 | | 9,60 | 4,69 | 63,10 | 8,02 | 1123,30 | 350,20 | 55,68 |
| 12 | | 9,60 | 2,33 | 47,20 | 8,15 | 865,90 | 31,40 | 1,53 |
| 13 | | 9,60 | 4,23 | 55,30 | 7,56 | 1036,00 | 33,20 | 3,42 |
| 1 | | 12,88 | 8,25 | 64,05 | 7,85 | 599,50 | 371,00 | 56,30 |
| 2 | | 12,88 | 13,50 | 104,81 | 7,45 | 483,80 | 520,00 | 82,90 |
| 3 | | 12,88 | 11,47 | 89,05 | 6,73 | 769,60 | 18,70 | 2,02 |
| 4 | | 12,88 | 11,50 | 89,29 | 7,40 | 48,58 | 13,40 | 0,83 |
| 5 | | 12,88 | 2,41 | 18,71 | 7,70 | 470,50 | 21,10 | 0,84 |
| 6 | | 12,88 | 11,02 | 85,53 | 6,94 | 554,20 | 37,80 | 0,83 |
| 7 | Janeiro | 12,88 | 11,35 | 88,12 | 6,39 | 820,70 | 13,50 | 1,19 |
| 8 | | 12,88 | 12,63 | 98,06 | 7,07 | 73,84 | 13,60 | 2,24 |
| 9 | | 12,88 | 11,35 | 88,12 | 6,76 | 680,60 | 71,00 | 1,31 |
| 10 | | 12,88 | 11,29 | 87,66 | 6,69 | 672,70 | 10,90 | 0,65 |
| 11 | | 12,88 | 11,60 | 90,06 | 7,49 | 408,40 | 35,00 | 1,12 |
| 12 | | 12,88 | 11,60 | 90,06 | 7,74 | 762,80 | 111,00 | 6,05 |
| 13 | | 12,88 | 11,70 | 90,84 | 7,26 | 813,40 | 31,90 | 1,60 |
| 1 | | 11,36 | 6,23 | 54,84 | 7,79 | 729,60 | 235,00 | 8,47 |
| 2 | | 11,36 | 10,00 | 88,03 | 7,15 | 424,40 | 520,00 | 75,60 |
| 3 | | 11,36 | 9,50 | 83,63 | 6,70 | 687,80 | 20,20 | 1,44 |
| 4 | Fevereiro | 11,36 | 9,31 | 81,95 | 7,20 | 51,72 | 13,60 | 0,86 |
| 5 | | 11,36 | 2,47 | 21,74 | 7,75 | 437,40 | 11,20 | 1,18 |
| 6 | | 11,36 | 8,33 | 73,33 | 4,18 | 604,80 | 61,70 | 3,49 |
| 7 | | 11,36 | 9,24 | 81,34 | 6,48 | 692,90 | 12,60 | 1,11 |

| | | | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|--------|------|---------|--------|--------|
| 8 | | 11,36 | 9,50 | 83,63 | 7,13 | 75,84 | 16,70 | 1,42 |
| 9 | | 11,36 | 9,17 | 80,72 | 7,18 | 218,90 | 101,00 | 1,50 |
| 10 | | 11,36 | 9,24 | 81,34 | 6,91 | 570,30 | 17,20 | 1,55 |
| 11 | | 11,36 | 9,42 | 82,92 | 7,60 | 349,00 | 42,90 | 2,03 |
| 12 | | 11,36 | 10,12 | 89,08 | 7,71 | 891,10 | 282,00 | 10,10 |
| 13 | | 11,36 | 9,57 | 84,24 | 7,62 | 674,50 | 20,20 | 1,80 |
| 1 | | 9,76 | 4,50 | 46,11 | 7,99 | 1029,00 | 306,00 | 5,44 |
| 2 | | 9,76 | 10,62 | 108,81 | 7,16 | 521,30 | 520,00 | 123,00 |
| 3 | | 9,76 | 8,00 | 81,97 | 6,50 | 720,00 | 11,70 | 1,46 |
| 4 | | 9,76 | 10,67 | 109,32 | 7,00 | 56,92 | 3,80 | 0,59 |
| 5 | | 9,76 | 2,41 | 24,69 | 7,53 | 496,40 | 5,10 | 0,43 |
| 6 | | 9,76 | 10,20 | 104,51 | 5,97 | 878,60 | 218,00 | 10,10 |
| 7 | Março | 9,76 | 13,40 | 137,30 | 6,28 | 714,40 | 4,10 | 0,89 |
| 8 | | 9,76 | 11,13 | 114,04 | 6,85 | 78,11 | 12,60 | 2,97 |
| 9 | | 9,76 | 10,66 | 109,22 | 6,99 | 489,00 | 108,00 | 1,69 |
| 10 | | 9,76 | 10,67 | 109,32 | 6,45 | 551,00 | 10,10 | 1,10 |
| 11 | | 9,76 | 10,79 | 110,55 | 7,08 | 240,90 | 35,00 | 1,80 |
| 12 | | 9,76 | 10,54 | 107,99 | 7,45 | 767,60 | 514,00 | 19,50 |
| 13 | | 9,76 | 10,84 | 111,07 | 7,31 | 675,80 | 21,00 | 1,73 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|----------------|------|-------|-------|------|------|--------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| | Ferro Total | 0,53 | 4,06 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 0,15 | 0,07 | 0,55 | 0,03 | 0,13 | 0,14 |
| | Magnésio Total | 3,49 | 4,93 | 20,10 | 0,44 | 8,79 | 17,83 | 25,93 | 1,35 | 22,12 | 13,42 | 6,32 | 28,32 | 16,35 |
| | Potássio Total | 7,26 | 3,42 | 12,65 | 0,33 | 4,66 | 2,55 | 1,54 | 0,32 | 1,54 | 1,16 | 1,34 | 3,79 | 2,16 |
| Março | Alumínio Total | 0,14 | 0,00 | 0,13 | 0,06 | 0,00 | 0,20 | 0,18 | 1,18 | 0,13 | 0,29 | 0,00 | 0,00 | 0,17 |
| | Bário Total | 0,13 | 0,69 | 3,29 | 0,03 | 0,26 | 0,63 | 2,99 | 0,05 | 0,56 | 1,98 | 0,04 | 0,64 | 0,62 |
| | Cádmio Total | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Cobalto Total | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Cromo Total | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 |
| | Manganês Total | 8,26 | 52,36 | 62,42 | 0,09 | 3,51 | 105,73 | 68,15 | 0,32 | 50,25 | 39,45 | 0,09 | 15,48 | 6,65 |
| | Níquel Total | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Chumbo Total | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Cobre Total | 0,04 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Zinco Total | 0,02 | 0,01 | 0,06 | 0,00 | 0,02 | 0,07 | 0,08 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,02 |
| | Ferro Total | 0,28 | 28,97 | 0,09 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,12 | 0,71 | 0,08 | 0,20 | 0,00 | 7,42 | 0,07 |
| | Magnésio Total | 4,15 | 5,45 | 8,77 | 0,36 | 7,01 | 16,86 | 13,20 | 0,76 | 19,42 | 10,03 | 4,14 | 12,97 | 13,09 |
| | Potássio Total | 6,96 | 3,91 | 11,02 | 3,23 | 2,53 | 1,61 | 1,76 | 0,51 | 1,38 | 1,06 | 2,13 | 3,12 | 1,53 |

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and its Safe Disposal Options. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 950- 955. New Delhi, India: ELSEVIER. 2016. doi: 10.1016/j.proenv.2016.07.088.

BARAKWAN, R. A., PRATIWI, W. B., TRIHADININGRUM, Y., & BAGASTYO, A. Y. (2020). Electrolysis using Pt/SS electrodes for aluminum recovery from drinking water treatment sludge. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(6), 2130–2139. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01097-0>.

BOSCOV M. E. G., TSUGAWA J. K., MONTALVAN E. L. T. Beneficial Use of Water Treatment Sludge in Geotechnical Applications as a Sustainable Alternative to Preserve Natural Soils, *Sustainability* 2021, 13, 9848. <https://doi.org/10.3390/su13179848>.

BRASIL. Lei Federal no 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9. 605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

CASELLA, G.; BERGER, R. L. Inferência estatística. Cengage Learning, 2010.

CREMADES, L. V., CUSIDÓ, J. A., & ARTEAGA, F. (2018). Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. *Journal of Cleaner Production*, 201, 1071–1080. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.094>.

DE CARVALHO GOMES, S., ZHOU, J. L., LI, W., & LONG, G. (2019). Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 145(December 2018), 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.032>.

FÁVERO, L. P; BELFIORE, P. Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com Excel®, SPSS® e Stata®. Elsevier Brasil, 2017.

FIGLIARO F. A., RODGHER S., ITO C. Y. K., BARDINI V. S. S., KLINSKY L. M. G., Water sludge reuse as a geotechnical component in road construction: Experimental study *Cleaner Engineering and Technology*, Volume 9, August 2022, 100512.

FONSECA HERREÑO, L. C., VALDÉS SOLANO, D. M., RODRÍGUEZ SARABIA, K. D. CABELLO PÉREZ, J. O., & MUÑOZ QUINTERO, A. A. (2019). Drinking water treatment sludge as a partial substitute for clays in non-structural brick production. *Journal of Physics: Conference Series*, 1409(1), 0–6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1409/1/012013>.

GODOY, L. G. G. DE, ROHDEN, A. B., GARCEZ, M. R., COSTA, E. B. DA, DA DALT, S., & ANDRADE, J. J. DE O. (2019). Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 223, 939–950. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.333>.

GONÇALVES, F.; SOUZA, C. H. U.; TAHIRA, F. S.; FERNANDES, F.; TEIXEIRA, R. S. Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. *Revista DAE*. Ed. 205, 2017.

HIDALGO, A. M., MURCIA, M. D., GÓMEZ, M., GÓMEZ, E., GARCÍA-IZQUIERDO, C., & SOLANO, C. (2017). Possible Uses for Sludge from Drinking Water Treatment Plants. *Journal of Environmental Engineering*, 143(3), 04016088. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943.7870.0001176](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943.7870.0001176).

HINES, W. W.; MONTGOMERY, D. C.; GOLDSMAN, D. M. Probability and Statistics in Engineering. Gen-LTC Group, 2000.

HOWELLS, P.A; LEWIS, J.S; BEARD, B.D; OLIVER, W.I. Water treatment residuals as soil amendments: Examining element extractability, soil porewater concentrations and effects on earthworm. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018 n°162, pág. 334–340.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis 27 2012. Lista Brasileira de Resíduos Sólidos – Instrução Normativa n° 13, de 18 de dezembro de 2012. *Diário Oficial da União*, Brasília (DF). 2012 20 dez.

JING, F., HUI, B., YUDAN, X., RUI, Z., PULI, Z., DUO, B., ZENG, D., WEI, L., & XUEBIN,

L. (2020). Recycling of iron and aluminum from drinking water treatment sludge for synthesis of a magnetic composite material (ALCS-Fe-Al) to remove fluoride from drinking water. *Groundwater for Sustainable Development*, 11(March), 100456. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100456>.

LATTIN, J.; CARROLL, J. D.; GREEN, P. E. *Análise de dados multivariados*. São Paulo: Cengage Learning, v. 475, 2011.

LOBATO, L.C.S. *Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico*. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Sanitária. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MONTALVAN, E. L. T., *Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da estação de tratamento de água do município de Cubatão, SP*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. *Estatística básica*. Saraiva Educação SA, 2017.

RODRIGUES, L. P., & HOLANDA, J. N. F. (2013). Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento. *Cerâmica*, 59(352), 551–556. <https://doi.org/10.1590/s0366-69132013000400010>.

SABESP. *Dados dos sistemas produtores*. Portal dos mananciais, 2023. Disponível em: <https://mananciais.sabesp.com.br/HistoricoSistemas?SistemaId=1>. Acesso em: 17 mar. 2024.

SHEN, C., ZHAO, Y., LI, W., YANG, Y., LIU, R., & MORGEN, D. (2019). Global profile of heavy metals and semimetals adsorption using drinking water treatment residual. *Chemical Engineering Journal*, 372(February), 1019–1027. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.219>.

SILVA, J. R.; MENEZES, A. C. B.; PINTO, F. A. F. *Análise de eficiência da secagem térmica de lodos de estação de tratamento de águas: estudo de caso realizado na região metropolitana de São Paulo*. In: 31 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITARIA E AMBIENTAL, 2021. Anais Curitiba.

SUZELEI RODGHER, FABIANA ALVES FIORE, CRISTIANE YUMI KOGA ITO, V. S. DOS SANTOS BARDINI, L. M. G. K. (2022). Water sludge reuse as a geotechnical component in road construction: Experimental study. In *Bioresource Technology Reports*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100512>.

WASSERMAN, J. C., ALMEIDA, A. M., PEREZ, D. V., WASSERMAN, M. A., & MACHADO, W. (2019). Evaluation of contaminants spreading from sludge piles, applying geochemical fractionation and attenuation of concentrations model in a tropical reservoir. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(7). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7507-z>.

WOŁOWIEC, M., KOMOROWSKA-KAUFMAN, M., PRUSS, A., RZEPA, G., BAJDA, T. Removal of heavy metals and metalloids from water using drinking water treatment residuals as adsorbents: A review (2019) *Minerals*, 9 (8), 487. <https://doi.org/10.3390/min9080487>.

YANG, J., REN, Y., CHEN, S., ZHANG, Z., PANG, H., WANG, X., & LU, J. (2023). Thermally activated drinking water treatment sludge as a supplementary cementitious material: Properties, pozzolanic activity and hydration characteristics. *Construction and Building Materials*, 365(October 2022), 130027. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130027>.

ZHAO, Y. ; Liu, R.;y Awe, O.W.;Yang, Y; Shen, C. Acceptability of land application of alum-based water treatment residuals – An explicit and comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, 353, 2018, Pages 717-726, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.07.143>.

ZHAO, R., LIU, J., FENG, J., LI, X., & LI, B. (2021). Microbial community composition and metabolic functions in landfill leachate from different landfills of China. *Science of the Total Environment*, 767, 144861. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144861>.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com o trabalho desenvolvido, verificou-se que a gestão dos LETAs apresenta desafios significativos devido ao volume gerado e à complexidade de sua composição. Estudos indicam que, embora haja benefícios potenciais na reutilização dos LETAs, os riscos ambientais e os riscos associados à saúde, a presença de metais pesados e patógenos, exigem regulamentações específicas. Com isso, a integração desses conhecimentos e a promoção de estudos adicionais são essenciais para desenvolver práticas sustentáveis e seguras no manejo desses resíduos. Portanto sugere-se os temas abaixo para futuras pesquisas que visam contribuir com o desenvolvimento da temática.

Sugestões para Futuros Trabalhos:

1. **Estudos Longitudinais:** Realizar pesquisas a longo prazo para avaliar os efeitos contínuos da disposição de LETAs em solos e aterros.
2. **Desenvolvimento de Tecnologias:** Investigar novas tecnologias para tratamento e secagem dos LETAs, visando a redução de elementos tóxicos e melhoria na segurança ambiental.
3. **Avaliação de Impactos Econômicos:** Analisar os benefícios econômicos do uso de LETAs na agricultura e construção, comparando-os com os custos de disposição final.
4. **Normatização e Regulamentação:** Desenvolver e atualizar normas específicas para a disposição e reutilização de LETAs, baseando-se em resultados científicos robustos.
5. **Exploração de Alternativas Sustentáveis:** Examinar outras formas de aproveitamento dos LETAs, visando a sustentabilidade.

7. REFERÊNCIAS

AHMAD, T., AHMAD, K., & ALAM, M. (2016). Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept. *Journal of Cleaner Production*, 124, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.073>.

ARGUDO-GARCÍA, J. J., MOLINA-MORENO, V., & LEYVA-DÍAZ, J. C. (2017). Valorización de lodos procedentes de plantas de tratamiento de agua potable. Una apuesta por la economía circular y sostenibilidad. *Dyna (Spain)*, 92(1), 71–75. <https://doi.org/10.6036/8024>.

BOSCOV, M. E. G., TSUGAWA, J. K., & MONTALVAN, E. L. T. (2021). Beneficial use of water treatment sludge in geotechnical applications as a sustainable alternative to preserve natural soils. *Sustainability (Switzerland)*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/su13179848>.

COSENZA, J. P. DE ANDRADE, E. M., & DE ASSUNÇÃO, G. M. (2020). A circular economy as an alternative for Brazil's sustainable growth: Analysis of the national solid waste policy. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 9(1), 1–30. <https://doi.org/10.5585/GEAS.V9I1.16147>.

IORE, F. A., RODGHER S., ITO C. Y. K., SANTOS, V. S., BARDINI, L. M. G. K. (2022). Water sludge reuse as a geotechnical component in road construction: Experimental study. In *Bioresource Technology Reports*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100512>.

GODOY, L. G. G. DE, ROHDEN, A. B. GARCEZ, M. R., COSTA, E. B. DA, DA DALT, S., & ANDRADE, J. J. DE O. (2019). Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 223, 939–950. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.333>.

HIDALGO, A. M., MURCIA, M. D., GÓMEZ, M., GÓMEZ, E., GARCÍA-IZQUIERDO, C., & SOLANO, C. (2017). Possible Uses for Sludge from Drinking Water Treatment Plants. *Journal of Environmental Engineering*, 143(3), 04016088. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0001176](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001176).

KUČERA, T., TUHOVČÁK, L., & BIELA, R. (2018). Technical auditing of water supply systems – part 2: Water treatment plant. *Water Science and Technology: Water Supply*, 18(4), 1141–1150. <https://doi.org/10.2166/ws.2017.119>.

MORERA, S., COROMINAS, L., POCH, M., ALDAYA, M. M., & COMAS, J. (2016). Water footprint assessment in wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4741–4748. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.102>.

P, Li., & WU, J. (2019). Drinking Water Quality and Public Health. *Exposure and Health*, 11(2), 73–79. <https://doi.org/10.1007/s12403-019-00299-8>.

SANTOS, F. P. DOS. (2016). Estudo Da Incorporação Do Lodo De Eta Em Argamassa. *Universidade Federal Do Pampa, August*, 60.

NAZIR, A. K., MAHMOUD, E., ALI, M., & ALI, N. (2020). Safe and economic disposal of water treatment residuals by reusing it as a substitution layer in roads construction (spectroscopic and geotechnical study). *Environmental Science and Pollution Research*, 27(24), 30490–30501. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09371-2>.