

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUALIDADE AMBIENTAL
ÁREA CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

CLÁUDIO OLIVEIRA ROCHA

**LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO SUBSTRATO DE
FORMAÇÃO DE MUDAS E NA FITORREMEDIAÇÃO DE COBRE POR IPÊ-DE-
JARDIM**

**UBERLÂNDIA
2025**

CLÁUDIO OLIVEIRA ROCHA

**LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO SUBSTRATO DE
FORMAÇÃO DE MUDAS E NA FITORREMEDIAÇÃO DE COBRE POR IPÊ-DE-
JARDIM**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental – Mestrado, área de concentração em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Lucas Carvalho Basilio de Azevedo

**UBERLÂNDIA
2025**

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

R672 Rocha, Cláudio Oliveira, 1995-
2025 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO
SUBSTRATO DE FORMAÇÃO DE MUDAS E NA FITORREMEDIAÇÃO
DE COBRE POR IPÊ-DE-JARDIM [recurso eletrônico] / Cláudio
Oliveira Rocha. - 2025.

Orientador: Lucas Carvalho Basílio de Azevedo.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Qualidade Ambiental.
Modo de acesso: Internet.
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.685>
Inclui bibliografia.

1. Desenvolvimento sustentável. I. Azevedo, Lucas Carvalho
Basilio de, 1980-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia.
Pós-graduação em Qualidade Ambiental. III. Título.

CDU: 502.33

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

CLÁUDIO OLIVEIRA ROCHA

**LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO SUBSTRATO DE
FORMAÇÃO DE MUDAS E NA FITORREMEDIAÇÃO DE COBRE POR IPÊ-DE-
JARDIM**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental – Mestrado, área de concentração em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADO em 28 de novembro de 2025

Prof. Dra. Bruna Fernanda Faria Oliveira

UFU

Dr. Oswaldo Gomes Junior

DMAE

Prof. Dr. Lucas Carvalho Basilio de Azevedo
ICIAG-UFU
(Orientador)

**UBERLÂNDIA
2025**



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Qualidade Ambiental (PPGMQ)				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 15/2025, PPGMQ				
Data:	28 de novembro de 2025	Hora início:	de 08:30	Hora encerramento:	de 11:30
Matrícula do Discente:	12312MQA002				
Nome do Discente:	CLÁUDIO OLIVEIRA ROCHA				
Título do Trabalho:	LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO SUBSTRATO DE FORMAÇÃO DE MUDAS E NA FITOREMEDIADAÇÃO DE COBRE POR IPÊ-DE-JARDIM				
Área de concentração:	Meio Ambiente e Qualidade Ambiental				
Linha de pesquisa:	PROCESSOS AMBIENTAIS				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Efeitos de isolados microbianos sobre a planta, a rizosfera e o solo				

Reuniu-se presencialmente na sala 1BCG 100, no campus Glória, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental (PPGMQ), assim composta: Prof. Dr. Lucas Carvalho Basílio de Azevedo (Orientador); Prof.ª Dr.ª Bruna Fernanda Faria Oliveira (UFU); e Dr. Oswaldo Gomes Júnior (DMAE).

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa Prof. Dr. Lucas Carvalho Basílio de Azevedo apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Carvalho Basílio de Azevedo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/11/2025, às 11:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bruna Fernanda Faria Oliveira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/11/2025, às 11:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Oswaldo Gomes Júnior, Usuário Externo**, em 28/11/2025, às 11:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6894250** e o código CRC **9FDE648D**.

Referência: Processo nº 23117.084769/2025-27

SEI nº 6894250

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, a Deus por me sustentar perante todas as adversidades que aconteceram durante esta jornada e também por iluminar meus caminhos e me dar forças para que eu concluisse este desafio.

Aos meus pais, que me apoiaram e estavam presentes sempre que precisei.

Ao Departamento Municipal de Água e Esgoto de Uberlândia por fornecer o lodo de tratamento de água utilizado nesta pesquisa e, também, ao Programa Buriti pelo espaço no viveiro para o crescimento das mudas de ipê-de-jardim.

À minha chefe Priscilla que, durante todo o processo, sempre procurou me apoiar e por todo o esforço que fez e faz para que eu pudesse concluir este trabalho. À equipe de estagiários do Programa Escola Água Cidadã de 2022/2023 e Christyan, que me ajudaram a pensar e definir o tema deste trabalho.

Às pessoas importantes que conheci e encontrei pelo caminho, em especial à Marcela, que foi uma incrível fonte de apoio e me deu forças para concluir este trabalho.

Aos meus amigos da Panela: Gabriel, Marina, Mari, João, Arthur, Gibão, Sonim, que sempre estiveram comigo desde a graduação. Em especial à Andressa, que pegou na minha mão em um momento difícil e à Carol que, desde o dia em que decidi fazer o mestrado, mostrou-se feliz e disposta a me ajudar. Aos meus amigos do grupo LP:BR, que sempre mandaram boas vibrações.

Ao meu orientador Prof. Dr. Lucas Carvalho, aos professores do curso, ao coordenador do programa e à secretária, pelas orientações que contribuíram para o bom andamento do curso. Aos colegas do curso. À técnica de Laboratório Luciana pela ajuda nos dias passados no LAMIC.

A todos, o meu mais sincero agradecimento.

RESUMO

ROCHA, CLÁUDIO OLIVEIRA: Lodo de estação de tratamento de água como substrato de formação de mudas e na fitorremediação de cobre por ipê-de-jardim. 2025. 79 f. Dissertação (Mestrado em Qualidade Ambiental) – Universidade Federal de Uberlândia – MG.

A necessidade por água de qualidade é crescente, o que pressiona a produção das estações de tratamento de água (ETA). No processo de obtenção de água potável, há a geração do lodo de ETA. As destinações mais comuns para esse resíduo sólido incluem descarte em aterro sanitário, lançamento nas redes de esgoto ou diretamente em corpos hídricos. Pelo potencial de impacto ambiental, é crucial a realização de estudos para que se desenvolvam outras formas de destinação deste lodo. Neste contexto, este trabalho objetiva avaliar o uso do lodo da Estação de Tratamento de Água Capim Branco, localizada em Uberlândia – MG, como substrato para o crescimento de mudas e sua capacidade de promover a fitorremediação por *Tecoma stans* (L.) JUSS. ex KUNTH (Ipê-de-jardim) em solos contaminados com cobre. Para o primeiro ensaio, cinco tratamentos de concentrações de lodo (0%, 12,5%, 25%, 50% e 75%), para crescimento de mudas, foram estabelecidos. O tratamento 25% de lodo contribuiu para o aumento da altura, da massa fresca da parte aérea (MVPA), massa fresca da raiz (MVR) e massa seca da raiz (MSR), e diminuiu a porcentagem de redução de massa fresca para massa seca após secagem. Nesse sentido, tal concentração foi selecionada para a montagem de ensaio em solo contaminado com cobre para analisar o potencial de fitorremediação do Ipê-de-jardim em conjunto com aplicação de lodo da ETA (LETA). No segundo ensaio, foram realizados 6 tratamentos com diferentes associações (M1 - crescimento de ipê em solo não contaminado; M2 - ipê em solo com adição de LETA; M3 - ipê em solo contaminado por cobre; M4 - ipê em solo contaminado com cobre e adição de LETA; M5 - solo contaminado com cobre, sem crescimento vegetal; M6 - solo contaminado com cobre, com adição de LETA e sem crescimento vegetal. As plântulas germinadas em substrato comercial foram transplantadas para os vasos com os tratamentos para desenvolvimento durante 75 dias. Os tratamentos sem a presença de lodo (M1, M2) apresentaram melhor adsorção do cobre pela planta, porém, os tratamentos com lodo (M3, M4 e M6) apresentaram melhorias nas propriedades químicas do solo, com o aumento do pH e da soma de bases trocáveis, indicando um potencial de melhoria na fertilidade do solo.

Palavras-chave: LETA; metal pesado; biorremediação; mudas

ABSTRACT

ROCHA, CLÁUDIO OLIVEIRA. **Water treatment plant sludge as a substrate for seedling formation and in the phytoremediation of copper by ipê-de-jardim.** 2025. 79 f. Dissertação (Mestrado em Qualidade Ambiental) – Universidade Federal de Uberlândia – MG

The demand for high-quality water is increasing, which places growing pressure on the operation of water treatment plants (WTPs). During the production of drinking water, Water Treatment Plant Sludge (WTS) is generated. The most common disposal practices for this solid waste include deposition in sanitary landfills, discharge into sewage systems, or even direct release into water bodies. Due to its potential environmental impact, the study and development of appropriate management and disposal methods for this sludge are crucial. In this context, the present study aimed to evaluate the use of sludge from the Capim Branco Water Treatment Plant, located in Uberlândia, Minas Gerais, Brazil, as a substrate for seedling growth and its capacity to promote phytoremediation by *Tecomma stans* (L.) Juss. ex Kunth (yellow trumpetbush) in copper-contaminated soils. In the first experiment, five treatments with different sludge concentrations (0%, 12.5%, 25%, 50%, and 75%) were established for seedling growth. The 25% sludge treatment promoted increases in plant height, fresh shoot mass (FSM), fresh root mass (FRM), and dry root mass (DRM), and reduced the percentage loss from fresh to dry mass after drying. Based on these results, this concentration was selected for a subsequent experiment conducted in copper-contaminated soil to assess the phytoremediation potential of yellow trumpetbush combined with the application of WTP sludge. In the second experiment, six treatments with different combinations were evaluated: M1, growth of yellow trumpetbush in uncontaminated soil; M2, yellow trumpetbush grown in soil with WTS addition; M3, yellow trumpetbush grown in copper-contaminated soil; M4, yellow trumpetbush grown in copper-contaminated soil with WTS addition; M5, copper-contaminated soil without plant growth; and M6, copper-contaminated soil with WTS addition and without plant growth. Seedlings germinated in a commercial substrate were transplanted into pots containing the respective treatments and cultivated for 75 days. Treatments without sludge addition (M1 and M3) showed greater copper uptake by the plants, indicating that WTS may hinder the phytoremediation process. However, treatments containing sludge (M2, M4, and M6) showed improvements in soil chemical properties, including increased pH and sum of exchangeable bases, indicating potential enhancement of soil fertility.

Key words: WTPS; heavy metal; bioremediation; seedlings

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Município de Uberlândia, cidade em que está localizada a ETA Capim Branco	26
Figura 2 – Vista aérea ETA Capim Branco.....	27
Figura 3 – Painel de Telemetria ETA Capim Branco com detalhamento dos tanques existentes	28
Figura 4 – Locais de coleta de lodo centrifugado para garantir homogeneidade da coleta.....	29
Figura 5 – Recipientes para substratos devidamente preparados tampando as laterais e abrindo 6 furos no fundo para a drenagem da água de irrigação	32
Figura 6 – Processo de homogeneização dos tratamentos (progressão de adição de lodo) para a avaliação do crescimento de mudas de ipê-de-jardim no ensaio com diferentes concentrações de lodo (0%, 12,5%, 25%, 50% e 75%)	33
Figura 7 – Proveta de 1000 ml para medição do volume de substrato comercial a ser utilizado nos tratamentos para avaliação do crescimento de mudas de ipê-de-jardim.....	33
Figura 8 – Exemplo de vaso preenchido (amostra) onde foram semeadas as sementes de ipê-de-jardim para ensaio com diferentes concentrações de LETA e avaliação do crescimento de mudas.....	34
Figura 9 – Semeadura das amostras com sementes de Ipê-de-jardim em ensaio com doses crescentes de lodo de 0%, 12,5%, 25%, 50% e 75%.....	35
Figura 10 – Ensaio com diferentes concentrações de LETA (0%, 12,5%, 25%, 50% e 75%) pronto para destinação ao viveiro.....	35
Figura 11 – Identificação dos ensaios.....	36
Figura 12 – Disposição dos ensaios no viveiro do Programa Buriti – ETA Bom Jardim	36
Figura 13 – Irrigação por aspersão no viveiro do Programa Buriti – ETA Bom Jardim	37
Figura 14 – Indicação de medição da altura das mudas de ipê-de-jardim se desenvolvendo em substrato com diferentes concentrações de LETA.....	37
Figura 15 – Numeração das sementes em relação à etiqueta	38
Figura 16 – Separação da parte aérea das raízes após passados os 160 dias de desenvolvimento das mudas em substratos com diferentes concentrações de LETA.	38
Figura 17 – Plantas armazenadas para secagem	39
Figura 18 – Estufa para secagem das plantas.	39
Figura 19 – Possíveis sinais de anaerobiose nas plantas cultivadas nos tratamentos com grande presença de lodo T3 (50% lodo) e T4 (75% de lodo).....	44
Figura 20 – Tratamentos T3 (50% lodo) e T4 (75% lodo) após o preparo apresentando consistência plástica e pegajosa quando úmida.	45
Figura 21 – Exemplos de amostras T3 (50% de lodo) e T4 (75% de lodo) endurecidas após poucos dias no viveiro, em contato com irrigação e sol.....	45
Figura 22 – Altura média medida de <i>Tecoma stans</i> para os tratamentos TC: 0% lodo; T1: 12,5% lodo; T2: 25% lodo.....	47
Figura 23 – Evolução do crescimento das plântulas do dia da semeadura até o 160º dia do ensaio com substratos formados por diferentes concentrações de LETA.....	49
Figura 24 – Porcentagem de redução de massa seco em relação à massa fresca em cada um dos tratamentos.	52
Figura 25 – Gráfico da relação entre a altura da parte aérea e o diâmetro do coleto (H/DC) em cada tratamento.....	53
Figura 26 – Relação entre altura da parte aérea e a massa seca da parte aérea (H/MSPA)	54

Figura 27 – Relação entre a massa da matéria seca da parte aérea / massa da matéria seca da raiz (MSPA/MSR)	55
Figura 28 – Índice de Qualidade de Dickson	56
Figura 29 – Ponto de coleta de solo no Campus Glória da Universidade Federal de Uberlândia.	65
Figura 30 – Coleta do solo e acondicionamento em sacos de rafia visando a montagem do ensaio de fitorremediação de cobre a partir da associação de ipê-de-jardim e LETA.....	65
Figura 31 – Lodo em processo de secagem durante 10 dias ao ar livre	68
Figura 32 – Semeadura de <i>Tecoma stans</i> em bandeja de germinação para serem transplantadas para os tratamentos após 30 dias.	69
Figura 33 – Disposição do solo, lodo e produtos químicos antes da homogeneização para formação do tratamento 4	71
Figura 34 – Cova para o transplantio dos brotos de <i>Tecoma stans</i>	71
Figura 35 – Tratamentos distribuídos no viveiro do Departamento Municipal de Água e Esgoto de Uberlândia.....	72
Figura 36 – Adição de ureia sobre solo úmido de parcelas com crescimento de ipê-de-jardim	72
Figura 37 – Concentrações de zinco em cada tratamento evidenciando a maior concentração em tratamentos com a presença de LETA e cobre (M4 e M6).	76
Figura 38 – Concentrações de ferro no solo em tratamentos com crescimento de ipê, adição de cobre (200 mg por dm ³ de solo) e lodo de estação de tratamento de água.....	77
Figura 39 – Análise das concentrações de cobre no solo e nas folhas de <i>Tecoma stans</i> . As barras estreitas representam o intervalo de desvio padrão.	78
Figura 40 – Fator de Bioconcentração nos tratamentos com a presença do ipê-de-jardim, nela é expresso o potencial de fitorremediação baseado na razão entre concentração de cobre na planta pela concentração de cobre no solo.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do lodo de diferentes estações de tratamento espalhadas pelo Brasil.....	10
Tabela 2 – Análise e caracterização do lodo da ETA Capim Branco após 10 dias de secagem em tempo aberto com incidência solar e sem presença de chuva.....	30
Tabela 3 – Percentagens de concentração de LETA e substrato para formação do ensaio para análise do crescimento de mudas de Ipê-de-jardim.....	31
Tabela 4 – Composição do substrato comercial informada na embalagem.....	31
Tabela 5 – Disposição dos ensaios no viveiro	36
Tabela 6 – Taxa de Germinação das Sementes de <i>Tecoma stans</i>	43
Tabela 7 – Medidas observadas ao final dos 160 dias de crescimento das mudas	46
Tabela 8 – Análises estatísticas de Média, Desvio Padrão e Mediana da variável altura (H) a partir do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis	47
Tabela 9 – Taxa de crescimento das plântulas do 40º ao 160º dia após a semeadura.....	48
Tabela 10 – Análises estatísticas de Média, Desvio Padrão e Mediana da variável Diâmetro do Coleto (DC) a partir do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis.....	49
Tabela 11 – Análises estatísticas de Média, Desvio Padrão e Mediana da variável Massa Fresca da Parte Aérea (MVPA) a partir do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis	50
Tabela 12 – Análises estatísticas de Média, Desvio Padrão e Mediana da variável Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) a partir do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis	50
Tabela 13 – Análises estatísticas de Média, Desvio Padrão e Mediana da variável Massa Fresca da Raiz (MVR) a partir do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis	50
Tabela 14 – Análises estatísticas de Média, Desvio Padrão e Mediana da variável Massa Seca da Raiz (MSR) a partir do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis	51
Tabela 15 – Porcentagem de redução de massa fresca a massa seca após estufa a 60 °C	51
Tabela 16 – Análise e caracterização do solo coletado.....	66
Tabela 17 – Análise e caracterização do lodo da ETA Capim Branco.....	67
Tabela 18 – Materiais e produtos químicos utilizados na montagem do ensaio para cada tratamento.....	70
Tabela 19 – Distribuição das unidades amostrais em DBC.....	72
Tabela 20 – Variáveis químicas do solo e concentração de cobre na massa foliar dos tratamentos com adição de cobre e de lodo de estação de tratamento de água sob crescimento de ipê-de-jardim.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS

CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DC	Diâmetro do Coleto
DIC	Delineamento Inteiramente Casualizado
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgoto
ETA	Estação de Tratamento de Água
FBC	Fator de bioconcentração
H	Altura
H + Al	Acidez potencial
IQD	Índice de Qualidade de Dickson
LETA	Lodo de Estação de Tratamento de Água
MSPA	Matéria seca da parte aérea
MSR	Matéria seca da raiz
MST	Matéria Seca Total
pH	Potencial hidrogeniônico
SB	Soma de bases
t	Capacidade de Troca Catiônica efetiva
WTP	Water Treatment Plant
WTPS	Water Treatment Plant Sludge

SUMÁRIO

SEÇÃO 1: LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO SUBSTRATO DE FORMAÇÃO DE MUDAS E NA FITORREMEDIAÇÃO DE COBRE POR IPÊ-DE-JARDIM.....	1
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 OBJETIVOS	5
2.1. Objetivo Geral.....	5
2.2. Objetivos específicos	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1. Saneamento Básico	6
3.2. Tratamento de Água	6
3.3. Lodo de Tratamento de Água (LETA)	8
3.4. Usos agrícolas do LETA.	11
3.5. Uso de lodo de tratamento de água para remediação por metais.....	12
3.6. Caracterização da espécie de estudo: <i>Tecoma stans</i> (L.) JUSS. ex KUNTH	12
3.7. Perspectivas para o uso do sustentável do LETA	13
REFERÊNCIAS	15
SEÇÃO 2: LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO SUBSTRATO PARA A FORMAÇÃO DE MUDAS DE IPÊ-DE-JARDIM.....	23
1 INTRODUÇÃO	25
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
2.1 Caracterização do local de estudo	26
2.1.1 Coleta de Lodo da ETA Capim Branco	29
2.1.2 Caracterização do lodo da ETA Capim Branco	30
2.2 Ensaio com Lodo de ETA como substrato para mudas.....	31
2.3 Preparação das amostras de mudas	32
2.4 Delineamento Experimental	40
2.5 Parâmetros avaliativos	40
2.6 Tratamento Estatístico	41
2.7 Índices de Qualidade e Índice de Qualidade de Dickson (IQD)	41
2.7.1 Índices de Qualidade das Mudas	41
2.7.2 Índice de Qualidade de Dickson (IQD)	42
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
3.1 Taxa de germinação das mudas	42
3.2 Taxa de sobrevivência.....	46

3.3 Parâmetros de medidas	46
3.3.1 Crescimento das plântulas	46
3.3.2 Diâmetro do Coleto.....	49
3.3.3 Massa fresca e massa seca da parte aérea	49
3.3.4 Massa fresca e massa seca da raiz	50
3.4 Redução	51
3.5 Índices de Qualidade	52
3.5.1 Relação da altura da parte aérea / diâmetro do coleto (RHDC)	52
3.5.2 Relação da altura da parte aérea / massa da matéria seca da parte aérea (RHMSPA) ..	53
3.5.3 Relação entre a massa da matéria seca da parte aérea / massa da matéria seca da raiz (MSPA:MSR).....	54
3.6 Índice de Qualidade de Dickson (IQD)	55
4 CONCLUSÕES.....	56
REFERÊNCIAS	58
SESSÃO 3: LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E CRESCIMENTO DE <i>Tecoma stans</i> (L.) JUSS. ex KUNTH SOBRE SOLO COM ADIÇÃO DE COBRE	61
1 INTRODUÇÃO	63
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	64
2.1 Coleta do solo	64
2.2 Caracterização e preparo do solo e do lodo coletado.....	65
2.3 Preparo das amostras	68
2.3.1 Germinação das sementes.....	68
2.3.2 Preparo do ensaio e transplantio	69
2.4 Fator de Bioconcentração (FBC).....	73
2.5 Análise estatística.....	74
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
3.1 Caracterização química do solo e efeito dos tratamentos	74
3.2 Concentração de cobre no solo e nas folhas de <i>Tecoma stans</i>	77
3.3 Fitorremediação de cobre por <i>Tecoma stans</i>	79
4 CONCLUSÃO.....	80
REFERÊNCIAS	81
APÊNDICE I	85

SEÇÃO 1: LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO SUBSTRATO DE FORMAÇÃO DE MUDAS E NA FITORREMEDIAÇÃO DE COBRE POR IPÊ-DE-JARDIM

1 INTRODUÇÃO GERAL

A preocupação com a qualidade dos corpos hídricos e a disponibilidade de água potável vem crescendo, em decorrência da degradação ambiental e do aumento da demanda de consumo (Shahin *et al.*, 2019). Visando atender a demanda da população por água potável, e para a recuperação da qualidade ambiental, busca-se a otimização dos sistemas de tratamento em suas etapas, inclusive no tratamento dos resíduos gerados. Assim, com o aumento da quantidade de água tratada, eleva-se também a geração e a necessidade de destinação adequada de resíduos (Godoy *et. al*, 2019; Wang *et al.*, 2020).

Dessa forma, uma preocupação recorrente no tratamento da água é o subproduto gerado nesse processo, o Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA). Entende-se por lodo o acumulado de compostos inorgânicos, à base de alumínio e de ferro, e orgânicos suspensos, provenientes das etapas de flocação, decantação e filtração acrescidos de substâncias químicas empregadas nas etapas de tratamento (He *et al.*, 2024). Este material, após sua geração na Estação de Tratamento de Água (ETA), é considerado um resíduo.

Estima-se que, em média, cada ETA do tipo convencional pode gerar até 100.000 toneladas de lodo anualmente (Ahmad, *et al.*, 2016). No entanto, é importante ressaltar que este valor pode variar conforme as condições do corpo hídrico e da quantidade de água tratada. Considerando o constante crescimento da produção de LETA no mundo, é imediata a necessidade de buscar formas economicamente viáveis e ambientalmente corretas de destinação deste material (Cunha *et al.*, 2020).

As destinações finais mais comuns para o LETA são: disposição em aterros sanitários (Simão *et al.*, 2022), lançamento das descargas de lodo (lodo e grande quantidade de água) nas redes de esgotamento (Richter, 2001) ou diretamente nos corpos hídricos (Simão *et al.*, 2022). Este último, muitas vezes, acaba sendo a destinação mais barata, porém, a que mais impacta o ambiente, uma vez que o lodo aumenta a carga de sólidos na água, contribuindo para a alteração do pH da água e para o assoreamento dos rios (Wang *et al.*, 2018; Simão *et al.*, 2022). As demais

destinações tendem a ter maior custo financeiro (destinação em aterros), ou prejuízos operacionais, uma vez que podem sobrecarregar as estações de tratamento de esgoto (ETE) (Ahmad *et al.*, 2016; Bernegossi *et al.*, 2022).

Por conta dos altos custos ambientais e financeiros de destinação do lodo, diversos países tem se esforçado para desenvolver estratégias e alternativas de gestão e disposição final para este resíduo, como: reciclagem, recuperação de recursos (coagulante) (Abba *et al.*, 2022), reuso na agricultura (Bernegossi *et al.*, 2022), uso como adsorvente de poluentes (Muisa *et al.*, 2020), coagulante para tratamento de esgoto (Ahmad *et al.*, 2016), e uso para remoção de metais pesados (Ghorpade; Ahammed, 2018).

A presença de matéria orgânica, além de macro e micronutrientes no LETA, pode fazer com que este material funcione como um condicionador do solo. O lodo pode melhorar a estrutura, retenção de água, condutividade hidráulica, porosidade e fertilidade do solo (Dassanayake *et al.*, 2015; Bernegossi *et al.*, 2022). Além disso, o LETA tem potencial para ser usado como meio de desenvolvimento de mudas de plantas, mesmo o lodo com a presença de coagulantes de alumínio (Brito, *et al.*, 2021).

No mais, por sua superfície específica e pelo teor de matéria orgânica, o LETA tem capacidade de retenção de metais pesados em solos contaminados (Morselli *et al.*, 2022). Solos poluídos com metais pesados apresentam risco ecológico e à saúde animal e humana, visto que estes elementos têm capacidade de bioacumulação e, em excesso, causam desequilíbrio no metabolismo celular nos organismos ao longo dos níveis da cadeia trófica (Mendonça *et al.*, 2021).

Em experimentos utilizando solo e lodo de ETA, foi observado que o LETA tem de 5 a 6 vezes mais capacidade de reter metais pesados como Chumbo (Pb) e Cádmio (Cd) do que um solo derivado de saprolito de basalto, argiloso, pH 5,5; 25 g kg⁻¹ de matéria orgânica e capacidade de troca catiônica (CTC) de 6,3 cmol_c kg⁻¹ (Souza *et al.*, 2019). Isso pode ocorrer devido à alta carga orgânica do lodo que auxilia na estabilização dos metais, via complexação, e, assim, reduz sua biodisponibilidade (Souza *et al.*, 2019).

Uma alternativa para a remoção de metais pesados do solo é a fitorremediação. Esta técnica de remediação se baseia na acumulação, volatilização e transformação de poluentes, como metais pesados, pelo uso de plantas (Shen *et al.*, 2021). Entre as técnicas de fitorremediação destacam-se: fitoacumulação, em que as plantas absorvem os contaminantes; fitoestabilização, em que a vegetação imobiliza os metais; fitovolatilização, que envolve a

absorção dos contaminantes pelas plantas e posterior liberação na atmosfera; (Muthusaravanan *et al.*, 2018).

Pelo seu potencial de promover crescimento vegetal e reter metais, o LETA tem a capacidade de melhorar a remediação de metais pesados (Abba *et al.*, 2022). Um dos elementos que causam contaminação é o cobre, provenientes da mineração, metalurgia, galvanoplastia e uso de fungicidas (Mendonça *et al.*, 2021).

A capacidade de adsorção do cobre por lodo de ETA tem sido constantemente relatada com resultados positivos. Os trabalhos de Abba *et al.*, 2022 e Shahin *et al.*, 2019 concluíram que, em uma solução aquosa, o lodo se mostrou adequado para a remoção de íons de cobre. Ainda segundo os autores, o LETA surge como uma alternativa de baixo custo para a remoção de poluentes como o cobre. Entretanto, pouco se tem estudado a respeito do uso do lodo na imobilização de metais pesados diretamente no solo.

O uso de lodo de diferentes estações, como em Bouria na Argélia, indica potencial de adsorção de cobre (Cu), removendo cerca de 93% de uma solução sintética (Abba *et al.*, 2022). Em outra estação, localizada na cidade de Zagazig, Egito, foi observado que a adsorção de Cu por lodo variou conforme a concentração do metal, atingindo 100% de remoção a uma concentração de 50 mg/L e 80% em outra solução com 1000 mg/L (Shahin *et al.*, 2019). Além disso, a utilização de plantas para a remoção do metal (fitorremediação) também tem se mostrado eficiente, reduzindo as concentrações de metais que podem ser lixiviados para lençóis freáticos, por exemplo (Mendonça *et al.*, 2021). No entanto, o efeito para descontaminação do uso conjunto de LETA e planta para fitorremediação é pouco conhecido.

A cidade de Uberlândia - MG conta com três estações de tratamento de água, sendo a mais recente delas, a ETA Dep. Luiz Humberto Carneiro (Capim Branco), inaugurada em 31 de agosto de 2021 (Dmae, 2021), de onde provém o lodo objeto deste estudo. A empresa gestora da estação é uma autarquia municipal chamada Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE). O lodo produzido em Uberlândia tem dois destinos: a ETA Capim Branco encaminha-o para o Aterro Sanitário, enquanto as ETAs Sucupira e Bom Jardim encaminham-no para a estação de tratamento de esgoto. O lodo utilizado neste trabalho foi coletado do Sistema Produto de Água Capim Branco, uma estação localizada no setor leste da cidade de Uberlândia/MG.

Considerando a diversidade vegetal urbana, buscou-se avaliar o potencial do LETA na formação de mudas e na fitorremediação de cobre do solo com uma espécie vegetal de ocorrência na cidade. Uberlândia pode ser considerada uma cidade relativamente arborizada,

possuindo diversas espécies vegetais em seu centro urbano, além de oito Unidades de Conservação (UC) distribuídas pelo perímetro urbano da cidade (Uberlândia, 2025). Nas cidades, muitas espécies acabam se perpetuando devido à sua fácil germinação, capacidade de adaptação e proliferação. Dessa forma, é interessante a utilização destas espécies para fins de beneficiamento ambiental, como paisagismo, melhora do microclima e a fitorremediação, por exemplo.

Uma das espécies passíveis de utilização é o ipê-de-jardim (*Tecoma stans* (L) Juss. ex Kunth). O ipê-de-jardim é uma planta arbustiva com flores amarelas em formatos de sino, nativa de regiões tropicais e subtropicais, comumente encontrada na América do Sul, África, Oceania e Ásia. A *Tecoma stans* é bastante utilizada como agente fitoterápico devido ao seu potencial medicinal, inclusive foi aprovado e listado na lista de plantas da *Medicinal Plant Names Services* (Anand; Basavaraju, 2021). Devido a sua excelente adaptação, rápido crescimento, capacidade de cultivo em vários tipos de solos, inclusive os de baixa fertilidade, resistência a doenças e uma carência de estudos abrangentes sobre esta planta como fitorremediadora (Singh *et al.*, 2024), optou-se por essa espécie para realização desta pesquisa.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa foi avaliar o uso do LETA como substrato para o crescimento de mudas de *Tecoma stans* (Ipê-de-jardim). Adicionalmente, pretende-se avaliar a capacidade de fitorremediação pelo ipê-de-jardim em interação com o lodo em solo contaminado com cobre.

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar a capacidade do lodo de promover o crescimento de mudas de ipê-de-jardim.
- Avaliar o efeito da adição de LETA no crescimento de ipê-de-jardim na fitorremediação de solo contaminado com cobre.
- Determinar os efeitos de adição de LETA na absorção e na concentração de cobre na parte aérea do ipê-de-jardim.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Saneamento Básico

Entende-se por saneamento básico o conjunto de ações, serviços e infraestrutura que visam prevenir doenças, promover a saúde pública, melhorar a qualidade de vida e proporcionar condições favoráveis ao desenvolvimento econômico sem gerar danos ao meio ambiente ou à saúde humana. Além disso, este conjunto tem por objetivo o controle e a modificação de fatores ambientais que permitem a manutenção do bem-estar físico, mental e social dos cidadãos (Silveira, 2024).

Paralelamente, a legislação brasileira define o saneamento básico como serviços básicos para promoção da saúde e do bem-estar da população; estes serviços estão divididos em quatro pilares: abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, drenagem e manejo das águas pluviais urbanas. É importante ressaltar que para a implementação destes pilares devem ser levadas em consideração, fundamentalmente, as particularidades de cada local e região, sendo assim, os municípios podem adaptar as soluções a partir de suas realidades territoriais e socioeconômicas (Pinheiro, *et al.*, 2024).

É importante salientar que, atualmente, é discutido, em conjunto com o saneamento básico, o saneamento ambiental, este, por sua vez, além dos serviços e ações direcionadas ao ser humano e suas necessidades básicas, incorpora as questões ambientais, incluindo o ser humano e o meio ambiente ao seu redor (Gonçalves, 2022).

3.2. Tratamento de Água

O tratamento de água é um sistema com processos de conversão de água bruta (água em seu estado natural) em água potável. O principal objetivo do tratamento é a remoção de matéria orgânica e micro-organismos patogênicos (Who, 2017). Durante o processo de tratamento, é gerado um resíduo proveniente da potabilização da água que pode ser empregado como subproduto: o lodo de estações de tratamento de água (LETA).

Diversas cidades no Brasil não têm acesso à água potável proveniente de sistemas de tratamento eficientes (Who, 2017). A ineficiência de um tratamento, ou a falta deste, ainda é

um transtorno para a saúde pública e um dos fatores da recorrência de doença infecciosas (Who, 2017). Segundo o Sistema Nacional de Informações Sobre o Saneamento Básico (SINISA), no ano de 2022, 84,9% da população tinham acesso à água potável (Sinisa, 2024). Ou seja, apesar do investimento ter aumentado de R\$7,76 bilhões (2021) para R\$9,67 bilhões (2022) mais de 15% da população (cerca de 33,4 milhões de pessoas) ainda não tem contato com uma água de qualidade no país.

Para se ter uma água de qualidade, diversos fatores devem ser analisados e, com o tratamento da água em uma estação, as determinações regulamentadas pelo Ministério da Saúde devem ser cumpridas. De acordo com a Portaria GM/MS nº 888 de 4 de maio de 2021, mais de 130 parâmetros devem ser atendidos para a garantia da qualidade da água para consumo humano, sendo eles microbiológicos, físicos, químicos e radioativos.

Dentre os padrões exigidos, três deles devem ter uma maior atenção para a formação do lodo: turbidez (por indicar a presença de sólido suspensos na água), cor (indicador sólidos dissolvidos na água) e sólidos totais. No Brasil, grande parte das amostras de água potável analisadas apresenta, mesmo após tratamento, parâmetros fora dos padrões de potabilidade recomendado pela legislação (Fioravanti *et al.*, 2022).

Os sistemas de tratamento de água brasileiros, em sua maioria, contam com tratamento convencional composto pelas etapas de coagulação, flocação, decantação, filtração e desinfecção. Este modelo é eficiente para tratar águas provenientes de corpos hídricos de Classe II. No tratamento convencional, há utilização de coagulante a base de ferro ou alumínio, a solução passa por um misturador rápido (Calha Parshall) e posteriormente é direcionada para a etapa de flocação onde o coagulante entrará em contato com as partículas de matéria orgânica formando-se flocos maiores e de maior massa. Posteriormente, os flocos formados serão removidos por decantação/sedimentação, nesta etapa, há a maior remoção de coloides. Parte do material floculado ainda avança junto da água para a etapa de filtração onde há camadas de antracito e areia para a remoção do sobressalente da etapa anterior. Por fim, na etapa de desinfecção é feita a eliminação de microrganismos através do uso de cloro e a correção do pH (Proença; Szélige, 2023).

Dessa forma, é evidente a necessidade de constantes melhorias nos sistemas de tratamento, além de manutenções e verificações periódicas a fim de detectar fatores que possam comprometer os sistemas de potabilização e, consequentemente, a saúde da população (Dores;

Santos, 2021). Além disso, é necessária uma atenção à gestão dos resíduos gerados nos sistemas de tratamento de água (Bernegossi *et al.*, 2022).

3.3. Lodo de Tratamento de Água (LETA)

O LETA é um resíduo gerado no processo de potabilização da água, este subproduto surge da remoção da carga orgânica da água, que acontece nos estágios de sedimentação e filtração, a qual é resultado dos processos físicos de floculação e coagulação (Almeida *et al.*, 2024). A composição básica do lodo é bastante variada e depende da qualidade do corpo d'água capitado e dos produtos químicos utilizados (Figueiredo Neto, 2011). Em geral, sua constituição é: água, sólidos orgânicos (suspensos e dissolvidos), minerais, metais, não metais e químicos provenientes da adição de produtos (reagentes e coagulantes) adicionados para compor o processo de tratamento.

Dessa forma, no LETA, normalmente, há a incidência significativa de metais como ferro, manganês e alumínio, além de matéria orgânica e outros sólidos (areia, silte, poluentes) que tem potencial tóxico para o meio ambiente (Bernegossi *et al.*, 2022; Figueiredo Neto, 2011; Tafarel *et al.*, 2016).

Grande parte do lodo gerado nas estações de tratamento de água do Brasil é lançado *in natura* diretamente nos corpos hídricos (Almeida *et al.*, 2024). Com isso e, considerando os componentes presentes na sua composição, o lodo pode gerar diversos impactos significativos nos rios como: morte dos organismos aquáticos, assoreamento, além de alterações biológicas na fauna e flora. Dessa forma, é de suma importância a gestão ambientalmente correta deste resíduo (Tafarel *et al.*, 2016).

A composição físico-química do lodo pode ser alterada, conforme a região e o corpo hídrico do qual ele se origina (Tabela 1). Silva *et al.*, 2019 estudaram o lodo de uma estação de tratamento de água localizada em Belém do Para (PA) e encontram, em suas análises, um lodo com grande concentração de silício, alumínio e ferro, comum em materiais argilosos e siltosos, comumente encontrado em solos amazônicos. Neves *et al.*, 2019 trabalharam com lodo proveniente de uma ETA localizada em Sengues, no Paraná, este lodo apresentou uma alta concentração de manganês, proveniente do poço de origem da água captada para tratamento, devido a elevada concentração de oxigênio dissolvido.

Além disso, o lodo utilizado nos estudos de Oliveira *et al.*, 2023 foi coletado da ETA do município de Palmeira dos Índios – Alagoas, a qual capta água do Rio Coruripe. Neste estudo, os autores verificaram um lodo altamente arenoso (90,39%), além da presença de altas concentrações de Si e Al influenciado, segundo os autores, pelo coagulante utilizado (Policloreto de Alumínio – PAC) na estação climática da época e na umidade da amostra.

Tabela 1 – Composição química do lodo de diferentes estações de tratamento espalhadas pelo Brasil.

Cidade/Estado	Análise Química (%)										Textura			Referência	
	MOt	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Zn	Si	Al	Areia	Silte	Argila	
Uberlândia/MG	47,80	1,22	0,22	0,63	0,10	1,10	1,03	0,09	0,01	-	-	85,00	5,00	10,00	Este trabalho ¹
Palmeira dos Índios/AL	-	-	2,33	7,81	2,51	-	1,22	-	5,82	55,65	-	90,39	9,61	Oliveira <i>et al.</i> , 2023 ²	
Alegrete/RS	-	0,35	0,55	0,42	0,48	-	11,58	-	0,07	36,11	32,31	71,12	22,15	6,73	Petterle, <i>et al.</i> , 2018 ³
Sengues/PR	-	0,15	0,23	1,00	0,18	0,06	3,49	22,83	0,60	-	-	-	-	-	Neves, 2019 ⁴
Belém do Pará/PA	-	0,68	1,14	0,29	1,28	0,77	13,20	0,10	-	27,06	21,38	-	-	-	Silva <i>et al.</i> , 2019 ⁵
Caçapava do Sul/RS	51,61	0,34	0,72	0,44	-	0,43	11,10	0,38	-	17,80	16,50	-	-	-	Santos, 2016 ⁶
Média	49,70	0,55	0,86	1,76	0,91	0,59	6,94	5,85	1,65	34,15	23,40	83,17	10,65	7,18	

¹ MOt: matéria orgânica total por combustão (espectrofotometria); P: fósforo (Meh-1); K: Potássio (Meh-1); Ca: Calcio (KCL 1 mol/L); Mg: Magnésio (KCL 1 mol/L); S: Enxofre (Fosfato monobásico de Cálcio); Fe: Ferro (DTPA); Mn: Manganês (DTPA); Zn: Zinco (DTPA).

²Fluorescência de Raio X

³Fluorescência de Raio X realizadas em um equipamento Philips, modelo PW 2400, com tubo de 3 kW e alvo de ródio. Foram usados os procedimentos de operação do equipamento e as normas NBR 9644 e NBR 128601

⁴Análise terceirizada: A preparação das amostras para o ensaio de absorção atômica seguiu o que determina o Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes Minerais, Orgânicos, Organominerais e Corretivos - SDA - Nº 28 de 27/07/2007, do Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento

⁵No artigo não informa os métodos e extratores

⁶Fluorescência de raio X (BRUKER – modelo SI TURBO SD)

Fonte: adaptado dos autores referenciados na última coluna, 2025.

3.4. Usos agrícolas do LETA.

São conhecidos diversos usos do LETA na agricultura, dentre eles, o uso em plantações, pastagens, jardins caseiros, parques públicos, florestas e áreas de proteção permanente. Essas possibilidades alternativas de destinação do lodo têm embasamento em suas propriedades físico-químicas e biológicas. A disposição do LETA em solos pode auxiliar na porosidade do solo e na retenção de umidade (Shah *et al.*, 2020), sendo assim, com a aplicação controlada e dentro das propriedades do solo-alvo, é possível enriquecer o terreno ou, pelo menos, não haver prejuízos na área de aplicação (Ahmad *et al.*, 2016).

No entanto, a aplicação do lodo na agricultura deve ser feita de forma controlada já que ele pode conter poluentes com capacidade de permanecer no solo ou lixivar para lençóis freáticos, porém, quando aplicado nas concentrações corretas e na ausência de contaminantes, o lodo não apresenta malefícios aos sistemas ambientais e biológicos (Bernegossi *et al.*, 2022; Dassanayake *et al.*, 2015).

Ahmad *et al.* (2016) compilaram, em sua revisão, diversas informações sobre os usos para o lodo na agricultura. Nos sistemas de tratamento de água, por exemplo, há a correção do pH da água com a utilização de produtos químicos à base de calcário, este produto confere ao lodo a capacidade de controle de pH, quando utilizado em solos ácidos.

Outra utilização possível para o lodo é como substituto para o solo superficial em áreas degradadas. As características físico-químicas do LETA, geralmente, são consideradas adequados para o crescimento de plantas e, com exceção do fósforo, apresenta os nutrientes necessários para o desenvolvimento da flora. Porém, é necessário atenção, pois em alguns ensaios foi verificada a presença de níveis fitotóxicos de NO_2 (Ahmad *et al.*, 2016).

Ademais, o LETA pode ser utilizado como substituto de solo para o cultivo de plantas. Figueiredo Neto (2011), em seus experimentos, utilizou o lodo para o cultivo de mudas de espécies originárias do Cerrado brasileiro. O autor utilizou-se de uma metodologia no qual misturava quantidades pré-definidas de latossolo vermelho-amarelo e lodo de ETA. Os testes apontaram que um tratamento com 56% de LETA teve o melhor índice de desenvolvimento da flora. Sendo assim, nota-se que é possível a contribuição deste resíduo com a nutrição do solo e crescimento de mudas. Porém, é necessário um estudo prévio relacionado à presença de metais pesados, uma vez que as plantas podem adsorvê-los.

3.5. Uso de lodo de tratamento de água para remediação por metais

Tratando-se de remediação de metais pesados no meio ambiente, diversas técnicas são conhecidas, entretanto, em geral, são técnicas de alto custo financeiro. Sendo assim, são necessárias alternativas emergentes para a remoção deste poluente. O LETA surge como uma opção devido a sua disponibilidade, baixo custo e características físico-químicas favoráveis ao processo de adsorção (Shahin *et al.*, 2019). O lodo de ETA apresenta, em geral, elevada superfície específica, porosidade e diversidade de grupos funcionais que favorecem a interação e a retenção de íons metálicos. (Abba *et al.*, 2022).

A aplicação do LETA como adsorvente vem apresentando resultados promissores na remoção de cobre (Cu) e zinco (Zn), alcançando eficiências superiores a 93% em condições ideais de pH, confirmando seu elevado desempenho em processos de sorção. Além disso, destaca-se a contribuição ambiental desta técnica, promovendo a utilização de resíduo gerado em grandes quantidades e reduzindo a dependência de adsorventes convencionais (Abba *et al.*, 2022).

Com isso, o uso de lodo de tratamento de água para a recuperação de solos degradados com metais pesados tem sido explorado nos últimos anos. Para tal, primeiramente, é necessária a análise da presença de metais no próprio lodo, visto que, por ser um material advindo da natureza, está passível de contaminação antrópica. Além disso, a capacidade de troca catiônica (CTC) precisa ser efetiva, já que a imobilização de metais pesados depende da relação de cargas negativas no lodo e no solo, logo, é relevante, também, neste processo, a concentração de matéria orgânica e argilominerais (Morselli, *et al.*, 2022).

3.6. Caracterização da espécie de estudo: *Tecoma stans* (L.) JUSS. ex KUNTH

A *Tecoma stans* conhecida como Ipê-de-jardim, Ipê-mirim ou Ipê-Amarelo-Mirim pertence à família Bignoniaceae. É uma planta nativa da América do Sul, porém, é encontrada em áreas de clima tropical e subtropical da África, Oceania e Ásia (Anand; Basavaraju, 2021). O ipê-de-jardim pode chegar a 8 metros de altura com 25 centímetros de diâmetro do caule, os folíolos das folhas apresentam contornos serrilhados e cumprimento de 3 a 12 cm, geralmente encontrados em números ímpares com folhas simples no primeiro nó e, posteriormente, posicionadas em pares opostos, a cor predominante é verde claro, com degradê (mais claro) nas

folhas mais altas (Rana *et al.*, 2023). As flores começam a crescer após 2 anos e apresentam um formato de sino ou trombeta e chegam a 4,5 cm de corola (Singh *et al.*, 2024).

O ipê-de-jardim é caracterizado como uma planta arbustiva, apresenta comportamento perene, logo, de fácil crescimento e germinação, além de se reproduzir a partir da dispersão de sementes (não apresentam dormência) que, por conta de suas características anemocóricas, percorrem longas distâncias com o auxílio do vento (Singh *et al.*, 2024). A germinação começa a ocorrer de 2 a 5 dias após a semeadura e, frequentemente, alcança taxas acima de 90%, especialmente em temperaturas entre 20 e 30°C com exposição à luz, além disso, suas sementes mantém boa viabilidade com pouca perda de vigor dentro de 12 meses (Vargas-Figueroa; Torrez-González, 2018).

Estudos recentes apontaram que as sementes plantadas em maiores profundidades (4.0 a 8.0 cm) tendem a ter uma taxa de germinação menor do que aquelas plantadas mais próxima à superfície (2.0 cm), o que é explicado pelas características fotossensíveis das sementes (Reis *et al.*, 2020). Em condições ambientais favoráveis, as plântulas do ipê-de-jardim crescem rapidamente, uma vez que sua raiz primária se estabelece em cerca de 8 dias, sugerindo um desempenho inicial vigoroso (Singh *et al.*, 2024). A raiz é caracterizada por seu crescimento pivotante em seu primeiro ano e posterior crescimento horizontal com ramificações secundárias (Anand; Basavaraju, 2021).

Foi uma planta que chegou ao território brasileiro como vegetação ornamental, porém, devido as suas características, celeremente, espalhou-se por áreas não cultivadas. A germinação e crescimento são rápidos quando em condições ambientais favoráveis (Singh *et al.*, 2024). Contudo, devido aos seus atributos como a coloração amarelada de suas flores que florescem o ano todo, esta espécie encontra-se como uma das principais plantas para ornamentação de praças e jardins (Massad *et al.*, 2015).

3.7. Perspectivas para o uso do sustentável do LETA

O LETA ocupa uma posição estratégica no conceito de sustentabilidade no saneamento básico. A grande geração deste subproduto e o seu descarte incorreto implicam na necessidade de soluções que reduzam os impactos ambientais e sejam economicamente viáveis. O LETA apresenta propriedades físico-químicas (porosidade, presença de matéria orgânica, CTC,

diversidade de grupos funcionais) que proporcionam a possibilidade tanto de uso agrícola como aplicação em técnicas de remediação ambiental (Shah *et al.*, 2020).

No âmbito do uso agrícola do LETA, este resíduo é capaz de melhorar as propriedades físicas do solo, contribuir com nutrientes e até substituir parcialmente o solo superficial em ambientes degradados (Shah *et al.*, 2020). Já para a remoção de metais pesados, a elevada área superficial, porosidade e a matéria orgânica do lodo favorecem processos de adsorção e imobilização de metais pesados (Abba *et al.*, 2022). Este cenário enquadra-se em princípios de economia circular, valorização de resíduos e tecnologias sustentáveis, aproximando o saneamento de práticas ambientais mais responsáveis.

Por fim, técnicas integrando um sistema planta-solo-lodo, considerando espécies como a *Tecoma stans*, potencializam alternativas como a fitorremediação no tratamento de ambientes contaminados. O LETA pode atuar como condicionador de solo e contribuir para a imobilização de contaminantes enquanto a planta, por sua vez, auxilia na absorção ou estabilização dos metais (Morselli, *et al.*, 2022).

Dessa forma, o LETA surge como uma oportunidade de solução inovadora e sustentável na formação de mudas e na gestão de solos contaminados. Porém, para isso, deve ser utilizado de forma correta, dando atenção à caracterização química deste resíduo, avaliações ecotoxicológicas e definição de limites de aplicação eficaz e segura. Sendo assim, este presente estudo aborda este campo buscando compreender e validar o uso do LETA em práticas agrícolas e de recuperação ambiental.

REFERÊNCIAS

- ABBA, A. B. *et al.* Copper and Zinc Removal from Wastewater Using Alum Sludge Recovered from Water Treatment Plant. **Sustainability**, [s.l.], v. 14, n. 16, p. e9806, 9 ago. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14169806>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/16/9806>. Acesso em: 23 mar. 2023
- AHMAD, T. *et al.* Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept. **Journal of Cleaner Production**, New Delhi, v. 124, p. e1–13, 15 jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.073>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261600250X>. Acesso em: 23 mar 2023.
- ALMEIDA, M. B. G. *et al.* Evaluating centrifuged water treatment plant sludge as an adsorbent for nutrients, microorganisms, and heavy metals removal from wastewater. **Journal of Cleaner Production**, São Paulo, v. 468, 25 august 2024. DOI: [10.1016/j.jclepro.2024.142975](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142975). Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/381679318_Evaluating_Centrifuged_Water_Treatment_Plant_Sludge_as_an_Adsorbent_for_Nutrients_Microorganisms_and_Heavy_Metals_Removal_from_Wastewater. Acesso em: 02 jun 2025.
- ANAND, M.; BASAVARAJU, R. A review on phytochemistry and pharmacological uses of *Tecoma stans* (L.) Juss. ex Kunth. **Journal of Ethnopharmacology**, [s.l.], v. 265, 113270, 30 jan 2021. DOI: 10.1016/j.jep.2020.113270. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32822823/>. Acesso em: 23 mar 2023.
- BERNEGOSSI, A. C. *et al.* A systematic review of the water treatment sludge toxicity to terrestrial and aquatic biota: state of the art and management challenges. **Journal of Environmental Science and Health**, [s.l.], v. 57, n. 4, p. e282–297, 22 apr 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/10934529.2022.2060021>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10934529.2022.2060021?scroll=top&needAccess=true>. Acesso em: 24 mar 2023.
- BRASIL. Lei Federal nº 11.445, de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**: seção 1, Brasília, DF, ano 143, n. 6, p. 3, 8 jan. 2007.

Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm.

Acesso em: 25 de abril de 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controlo e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília: Ministério da Saúde, 4 maio 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 31 de maio de 2024.

BRITO, S. A. *et al.* Utilização do lodo da ETA de Xique-Xique, BA: produção de mudas de *Cnidoscolus quercifolius* originária da Caatinga. **Revista Sertão Sustentável**, [s.l.], v.3, n.1, 2021. Acesso em: 23 abr 2023.

CUNHA, G. D. *et al.* Water treatment station body as a component for forestry management. **Ibero-American Journal of Environmental Sciences**, [s.l.] v. 11, n.1. p. e40-53, jan 2020. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.001.0005>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2020.001.0005>. Acesso em: 05 abr. 2023.

DASSANAYAKE, K. B. *et al.* A review on alum sludge reuse with special reference to agricultural applications and future challenges. **Waste Management**, [s.l.] v. 38, n. 1, p. e321–335, 1 abr. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.025>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/272079613_A_review_on_alum_sludge_reuse_with_special_reference_to_agricultural_applications_and_future_challenges. Acesso em: 05 abr 2023.

DORES, A. L. M.; SANTOS, F. C. V. Addressing the challenges in projects of water treatment plants and storage of potable water: a case studies of the water supply system in the state of Goiás, Brazil. **SN Applied Sciences**, [s.l.], v. 3, n. 3, p. e1–16, 1 mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04382-1>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-021-04382-1>. Acesso em: 05 abr 2023.

FERONE, C. *et al.* Sustainable management of water potabilization sludge by means of geopolymers production. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 229, p. e1–9, 20 ago. 2019. DOI: [10.1016/j.jclepro.2019.04.299](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.299). Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/332651103_Sustainable_management_of_water_potabilization_sludge_by_means_of_geopolymers_production. Acesso em: 14 ago 2024.

FIGUEIREDO NETO, A. **Use of sludge treatment plant water in the production of tree seedlings to occurrence in the savanna**. 2011. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011. Disponível em:
<https://repositorio.bc.ufg.br/tede/items/f4a959d1-552a-4b54-8937-14ed3a9026c6/full>. Acesso em: 23 mar 2023.

FIORAVANTI, M. I. A. *et al.* Panorama of the water supply in the Campinas region and a brief comparison with other regions in the Southeast of Brazil. **Revista Ambiente & Água**, [s.l.], v. 17, n. 4, p. e2835, 2 set. 2022. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2835>.

Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/MLRkXVTXHD4s7Jgd4cHYKJr/?format=html&lang=en>. Acesso em: 14 ago 2024.

GHORPADE, A.; AHAMMED, M. M. Water treatment sludge for removal of heavy metals from electroplating wastewater. **Environmental Engineering Research**, [s.l.] v. 23, n. 1, p. e92–98, 1 mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2017.065>. Disponível em:
<https://www.eer.org/journal/view.php?number=873>. Acesso em: 23 abr 2023.

GODOY, L. G. G. *et al.* Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 223, p. 939-950, 30 october 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.333>.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/335004218_Valorization_of_water_treatment_sludge_waste_by_application_as_supplementary_cementitious_material. Acesso em: 23 abr 2023.

GONÇALVES, Marcelo. Batista. **O poder público e os direitos fundamentais**: reflexões acerca da universalização do saneamento básico no Brasil. 2022. 114 f. Dissertação (Mestrado em Direito) - Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2022. Disponível em: <https://tede2.pucsp.br/handle/handle/39395>. Acesso em: 24 abr 2024

HE, Z. *et al.* Recycling drinking water treatment sludge in construction and building materials: A review. **Science of Total Environment**, [s.l.], v. 926, 20 maio 2024. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2024.171513](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171513). Disponível em:
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38460695/>. Acesso em: 12 out 2025.

MASSAD, M. D. *et al.* Alternative substrates in the production of seedlings of flamboyant and ipe-mirim. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 10, n. 2, p. e251-256, abr-jun, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v10i2.3475>. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7304202>. Acesso em: 05 abr 2023.

MENDONÇA, A. T. *et al.* Potencial de remoção de cobre do solo por técnicas de fitorremediação. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [s.l.], v. 12, n. 4, p. e520-529, abr 2021. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.004.0040>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2021.004.0040>. Acesso em: 17 mar 2024.

MORSELLI, L. B. G. A. *et al.* Lodo de estação de tratamento de água: possibilidade de aplicação no solo. **Scientia Plena**, [s.l.], v. 18, n. 5, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2022.051701>. Disponível em: <https://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/6524>. Acesso em: 06 abr 2023.

MUISA, N. *et al.* Utilization of alum sludge as adsorbent for phosphorus removal in municipal wastewater: A review. **Journal of Water Process Engineering**, [s.l.], v. 35, 1 jun. 2020. DOI: [10.1016/j.jwpe.2020.101187](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101187). Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/339546884_Utillization_of_alum_sludge_as_adsorbent_for_phosphorus_removal_in_municipal_wastewater_A_review. Acesso em: 28 nov 2023.

MUTHUSARAVANAN, S. *et al.* Phytoremediation of heavy metals: mechanisms, methods and enhancements. **Environmental Chemistry Letters**, [s.l.], v. 16, p. e1339-1359, jun 2018. DOI: [10.1007/s10311-018-0762-3](https://doi.org/10.1007/s10311-018-0762-3). Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-018-0762-3>. Acesso em: 14 ago 2024.

NEVES, Denis. Schechtel. **Análise da viabilidade técnica do uso, na agricultura, do lodo de ETA com elevado teor de manganês**. 2019. p.40. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Ponta Grossa, 2019. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/16313>. Acesso em: 14 ago 2024.

OLIVEIRA, S. F. M. *et al.* Caracterização do lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) da cidade de Palmeira dos Índios – Alagoas para potencial aplicação em massas cerâmicas. **Revista Matéria**, Palmeira dos Índios, v 28, n. 04. Jun 2023. DOI:

<https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0088>. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/rmat/a/6Dp7D8PKRPDVkhxqPhGHGjw/?format=html&lang=pt>.
Acesso em: 17 mar 2024.

PETTERLE, A. R. *et al.* Placas cerâmicas contendo lodo de ETA e cinza de casca de arroz: correlação de suas propriedades físico-químicas com sua microestrutura. **Química Nova.**, Alegrete, v. 41, n. 10, 18 set 2018. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170288>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/DtffFS3ZQ5hNJnJ9s33rpNL/?lang=pt>. Acesso em: 23 abr 2023.

PINHEIRO, R. R. *et al.* Saneamento básico no Brasil: panorama, definições e indicadores. **Sustentabilidade, Meio Ambiente e Responsabilidade Social: Artigos Selecionados**, . Belo Horizonte, v. 3, n. 1, jan 2024.. DOI 10.36229/978-65-5866-418-5. Disponível em: https://livros.poisson.com.br/ambiente/Responsabilidade_Social/volume3/Sustentabilidade_Responsabilidade_Social_Vol3.pdf. Acesso em: 02 jun 2025.

PREFEITURA MUNICIPAL. SECRETARIA MUNICIPAL DE GESTÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE. **Parques Municipais**, Uberlândia, 2025. Disponível em: [https://www.uberlandia.mg.gov.br/prefeitura/secretarias/gestao-ambiental-e-sustentabilidade/parques-municipais/#:~:text=Parque%20Municipal%20Virg%C3%A3Dlio%20Galassi%20%E2%80%93%20\(Parque,Bairro%20Tibery.\)](https://www.uberlandia.mg.gov.br/prefeitura/secretarias/gestao-ambiental-e-sustentabilidade/parques-municipais/#:~:text=Parque%20Municipal%20Virg%C3%A3Dlio%20Galassi%20%E2%80%93%20(Parque,Bairro%20Tibery.)). Acesso em: 12 out 2025.

PROENÇA, M. C. V.; SZÉLIGA, M. R. Sistema de tratamento convencional seguido de eletrodiálise aplicado à simulação de dessalinização de águas salobras. **Eng. Sanit. Ambient.**, Ponta Grossa, v. 28, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220294>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/ZJNh7Lkjw7pnpSKjCSZMNTR/?lang=pt>. Acesso em: 14 ago 2024.

RAMALHO, Raquel Pinheiro Reis Souza. **Avaliação do uso de resíduo de estação de tratamento de água na produção de espécies vegetais com ocorrência no cerrado**. 2015. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/items/350db040-5e9b-42e9-86b3-312c7d84a7ab>. Acesso em: 07 abr 2023.

RANA, N. *et al.* Coding phonological growth stages of yellow bells (*Tecoma stans* (L.) Juss. ex Kunth) based on BBCH scale and its implications for urban greening. **Current Plant**

Biology, [s.l.], v. 34, 10 apr 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2023.100284>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214662823000130>. Acesso em: 17 mar 2024.

REIS, A. C. C. *et al.* Anti-Zika vírus activity and chemical characterization by ultra-high performance liquid chromatography (UPLC-DAD-UV-MS) of ethanol extracts in *Tecoma* species. **BMC Complementary Medicine and Therapies**, Morro do Cruzeiro, v. 20, n. 246, 07 august 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12906-020-03040-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s12906-020-03040-0>. Acesso em: 12 out 2025.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2001. 113 f. ISBN 978-8521214854. E-book. Disponível em: <https://www.bvirtual.com.br/NossoAcervo/Publicacao/172610> SANTOS, Fernanda. Pasini dos. **Estudo da incorporação do lodo de ETA em argamassa**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal do Pampa – Unipampa, Caçapava do Sul, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/items/527f64d7-e627-4320-941f-691187c52a41>. Acesso em: 20 ago 2024.

SANTOS, M. A. *et al.* **O cerrado brasileiro**: notas para estudo. Texto para discussão n º 387. 15p. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <https://www.cedeplar.ufmg.br/pesquisas/td/TD%20387.pdf>. Acesso em: 06 abr 2023.

SHAH, S. A. R. *et al.* Compaction performance analysis of alum sludge waste modified soil. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 230, n. 10, 10 jan 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116953>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819323955>. Acesso em: 17 mar 2024.

SHAHIN, S. A. *et al.* Evaluation of copper removal efficiency using water treatment sludge. **Water Science and Engineering**, Mansoura, v. 12, n. 1, p. e37–44, 4 abr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.04.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674237019300225>. Acesso em: 14 ago 2024.

SHEN, X. *et al.* A critical review on the phytoremediation of heavy metals from environment: performance and challenges. **Chemosphere**, Quingdao, v. 291, 18 nov 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132979>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521034512>. Acesso em: 02 jun 2025.

SILVA, J. S. *et al.* Caracterização físico-química de lodo de estação de tratamento de água (ETA) com tratamento térmico a 650°C, e suas aplicações. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. 28., 2019, Belo Horizonte, 2019.

SIMÃO, L. R. *et al.* Estudo da aplicação de resíduo de estação de tratamento de água como parte agregada na produção do concreto. **Revista Multidebates**, Palmas, v. 6, n. 2., agosto de 2022. Disponível em:

<https://www.revista.faculdadeitop.edu.br/index.php/revista/article/view/499>. Acesso em: 28 nov 2023.

SINGH, S. *et al.* A comprehensive review on ecology, life cicle and use of *Tecoma stans* (bignoneaceae). **Botanical Studies**, Ludhiana, v. 65, n. 6, 13 feb 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40529-024-00412-4>. Disponível em:
<https://link.springer.com/article/10.1186/s40529-024-00412-4>. Acesso em: 02 jun 2025.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SINISA). Painel de Informações sobre Abastecimento de Água: ano de 2022. Brasília, DF, 2023. **Sinisa**. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snис/painel/ab> . Acesso em 25 de abril de 2024.

SOUZA, L. R. R. *et al.* Reduction of bioaccessibility and leachability of Pb and Cd in soils using sludge from water treatment plant. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [s.l.], v. 16, p. e5397-5408, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2042-y>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-018-2042-y>. Acesso em: 14 mar 2024.

TAFAREL, N. F. *et al.* Evaluation of concrete properties due to the incorporation of sludge from Water Treatment Plant. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v 21, n. 4, p. e974-986, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160004.0090>. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/rmat/a/GgR9NvqtH7KBQyH5KGZJKQ/abstract/?lang=en>. Acesso em: 23 mar 2023.

PREFEITURA MUNICIPAL DE UBERLÂNDIA. Lei nº 11.806, de 21 de maio de 2014. Altera a Lei nº 10.066, de 15 de dezembro de 2008. Dispõe sobre a criação do Programa

Buriti, autoriza o DMAE a fazer parceria e investimentos em propriedades rurais para a proteção e recuperação de nascentes da Bacia do Rio Uberabinha e do Ribeirão Bom Jardim, regulamenta o art. 2º da Lei Estadual nº 12.503/97 e dá outras providências. **Diário Oficial do Município**, ano XXVI, n. 4404, 2008. Disponível em: <https://www.uberlandia.mg.gov.br/wp-content/uploads/2019/07/4404.pdf>. Acesso em: 24 mar 2023.

VARGAS-FIGUEROA, J. A.; TORRES-GONZÁLEZ, A. M. Germination and seed conservation of a pioneer species, *Tecoma stans* (Bignoniaceae), from tropical dry forest of Colombia. **Revista de Biología Tropical**, [s.l.], v.66(2), p. e918-936, 2018 DOI: <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v66i2.33423>. Disponível em: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0034-77442018000200918&script=sci_arttext. Acesso em: 12 out 2025.

WANG, C. et al. Recycling of drinking water treatment residue as an additional medium in columns for effective P removal from eutrophic surface water. **Journal of Environmental Management**, Nanjing, v. 217, n. 1, p. e363-372, 1 july 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.128>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479718303670?ref=pdf_download&r=RR-2&rr=9bceaea06e50ae84. Acesso em: 14 jul 2024.

WANG, Z. et al. Occurrence and removal of microplastics in an advanced drinking water treatment plant (ADWTP). **Science of The Total Environment**, Nanjing, v. 700, 15 jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134520>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719345115>. Acesso em: 07 abr 2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum. Geneva, 2017, **Who**. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>. Acesso em: 26 abr 2023.

SEÇÃO 2: LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO SUBSTRATO PARA A FORMAÇÃO DE MUDAS DE IPÊ-DE-JARDIM

RESUMO

O aumento na demanda de água potável acompanha a geração de resíduos oriundos dos processos de tratamento de água. O lodo de estações de tratamento de água (LETA) é um resíduo que deve ser destinado de forma ambientalmente correta. A destinação menos impactante para o lodo é a disposição em aterros sanitários ou industriais, nesses casos, este resíduo ocupa um volume significativo e reduz a vida útil destes empreendimentos. Contudo, as destinações mais comuns são a descarga pelas redes de esgotamento sanitário, sobrecarregando as estações e reduzindo sua eficiência, e o lançamento do lodo *in natura* nos corpos hídricos, ocasionando em aumento da turbidez do rio, redução de oxigênio dissolvido, assoreamento e eutrofização. Assim, há a necessidade de propostas alternativas para destinação final deste resíduo. O uso agrícola do lodo tem sido apontado como potencial, uma vez que este material apresenta boa capacidade de retenção de umidade no solo e de nutrientes. Este trabalho tem o objetivo de avaliar a viabilidade do lodo da ETA Capim Branco, localizada em Uberlândia, MG, como substrato na formação de mudas de *Tecoma stans* (L.) JUSS. Ex KUNTH. Cinco concentrações de lodo (0%, 12,5%, 25%, 50% e 75%) homogeneizados com substrato comercial foram testadas. O tratamento com 25% de lodo apresentou maior germinação das plântulas, além disso, apresentou diferenças estatísticas quando comparado ao tratamento controle nos quesitos crescimento, massa fresca da parte aérea e raiz e massa seca da raiz. Os índices de qualidade e o índice de qualidade de Dickson apresentaram qualidade moderada para o desenvolvimento de mudas, sendo o tratamento de 25% de lodo o valor máximo para atingir bons resultados. Portanto, o LETA mostrou-se uma alternativa interessante como promovedor de formação de mudas, desde que seja utilizado até 25% na composição do substrato.

Palavras-chave: LETA; destinação; resíduo.

ABSTRACT

The increasing demand for drinking water is accompanied by the generation of waste from water treatment processes. Water treatment plant sludge (WTPS) is a residue that must be managed and disposed of in an environmentally appropriate manner. In Brazil and worldwide, the most common destinations for this sludge are landfills or industrial applications; however, in these cases, the material occupies considerable volume and reduces the operational lifespan of such facilities. More frequently, this residue is discharged into sewage collection networks, overloading wastewater treatment plants and reducing their efficiency, or disposed of directly into water bodies, which increases turbidity, decreases dissolved oxygen levels, and contributes to siltation and eutrophication. Therefore, it is necessary to propose alternative strategies for the final disposal of this residue. The agricultural use of WTPS has been considered a promising alternative, as this material exhibits good soil water retention capacity and provides nutrient availability. This study aimed to evaluate the feasibility of using sludge from the Capim Branco Water Treatment Plant, located in Uberlândia, Minas Gerais, Brazil, as a substrate for the production of *Tecoma stans* (L.) Juss. ex Kunth seedlings. Five sludge concentrations (0%, 12.5%, 25%, 50%, and 75%), homogenized with a commercial substrate, were evaluated. The treatment containing 25% sludge exhibited the highest seedling germination rate and showed significant differences compared to the control treatment in growth, shoot fresh mass, root fresh mass, and root dry mass. Quality indices and the Dickson Quality Index indicated moderate suitability for seedling development, with treatment T2 achieving the best performance. Therefore, WTPS proved to be a viable alternative for promoting seedling production, provided that it is used at concentrations of up to 25% in the substrate composition.

Key words: WTPS; destination; waste.

1 INTRODUÇÃO

A demanda por água potável cresce a cada ano de forma proporcional ao crescimento da população mundial. Com isso, é necessário que o sistema de saneamento básico seja eficiente a fim de fornecer condições de saúde adequadas à população (Silva *et al.*, 2024). Dentre os pilares do saneamento básico encontram-se o tratamento e a distribuição de água potável. Para a obtenção de água apta ao consumo é necessário um complexo sistema de tratamento denominado Estação de Tratamento de Água (ETA). Nessas estações, ocorrerem processos físicos e químicos para a correção de pH, desinfecção e remoção de carga orgânica (Sheng *et al.*, 2023).

A potabilização da água gera o lodo de ETA (LETA) e, como todo resíduo, deve ter destinação adequada (Urban *et al.*, 2023). Nas estações brasileiras, o lançamento em corpos hídricos tem sido o método mais utilizado pelo baixo custo de operação (Santos *et al.*, 2024). No entanto, o lançamento do lodo, diretamente nos rios, aumenta a concentração de carga orgânica e de nutrientes podendo acarretar assoreamento e eutrofização, dentre outros impactos (Hussein *et al.*, 2021).

Dessa forma, é fundamental buscar alternativas economicamente viáveis de destinação dos LETA (Cunha, *et al.*, 2020). Diversos estudos têm proposto novas formas de destinação deste resíduo (Martins *et al.*, 2022). O uso do lodo em solos aparece como uma opção para a destinação deste resíduo. O lodo tem capacidade de melhorar as propriedades físicas do solo, influenciando na porosidade, retenção de água e coesão do solo, sua utilização pode ser feita *in natura* ou após desidratação (Shah *et al.*, 2020). Com disso, a utilização do lodo para fertilização no solo e/ou substrato para o plantio de mudas tem se mostrado uma alternativa promissora (Brito *et al.*, 2021).

Estudos apresentaram resultados positivos em relação ao uso do lodo na formação de mudas em algumas regiões. Assim, a aplicação deste resíduo no cultivo de mudas em viveiros pode ser uma alternativa para a destinação e reaproveitamento do lodo (Figueiredo Neto, 2011).

Neste contexto, o presente estudo avaliou doses do lodo da ETA Capim Branco (Uberlândia, MG) como componente do substrato de formação de mudas de *Tecoma stans* (Ipê-de-jardim). A hipótese foi de que o uso do lodo de estação de tratamento de água na composição do substrato base pode auxiliar no desenvolvimento das plantas, sendo assim, foram utilizadas diferentes concentrações de lodo na montagem dos tratamentos para avaliar sua influência no crescimento das mudas de ipê-de-jardim. Devido a sua excelente adaptação, rápido

crescimento, capacidade de cultivo em vários tipos de solos, inclusive de baixa fertilidade (Singh *et al.*, 2024), optou-se por essa espécie para a realização desta pesquisa.

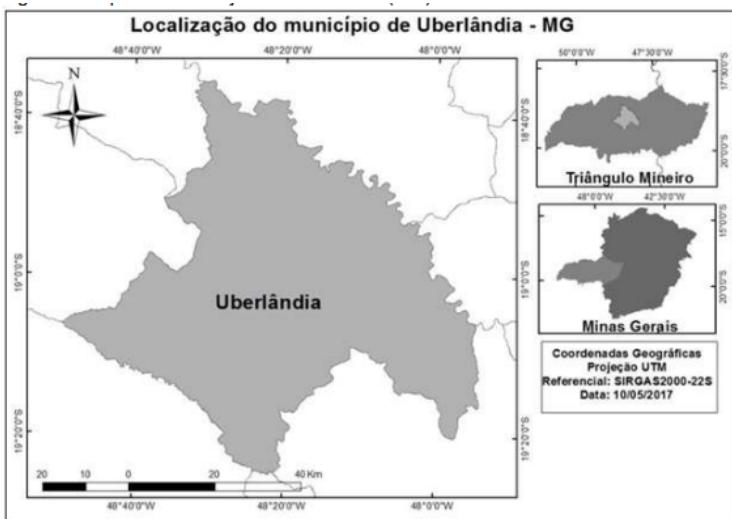
2 MATERIAL E MÉTODOS

Foi montado um ensaio para o estudo do uso do lodo como substrato para o crescimento de mudas de *Tecoma stans* (L.) JUSS. ex KUNTH em diferentes concentrações.

2.1 Caracterização do local de estudo

A cidade de Uberlândia/MG (Figura 1) tem população estimada em 706.597 pessoas (IBGE, 2021) e área territorial de 4.115,206 km². O clima é marcado por duas estações bem definidas, com inverno seco de maio a setembro e verão quente e chuvoso de final de outubro a início de abril.

Figura 1 – Município de Uberlândia, cidade em que está localizada a ETA Capim Branco



Fonte: IBGE, 2023.

A ETA Capim Branco está localizada nas coordenadas 18°51'10.44" S 48°8'33.7128" O. A estação conta com um sistema convencional de ciclo completo (Figura 2), com utilização de Cloreto de Poli Alumínio (PAC) como coagulante, tratando cerca de 600 a 1000 litros por segundo (com capacidade para até 2 mil litros por segundo). A água bruta é bombeada por motores elétricos, para vencer a diferença de altitude e a distância entre a captação e a estação. Ao chegar à estação, o líquido passará pela Calha Parshall, onde receberá a pré-cloração,

neutralização do pH e o coagulante. Em seguida, o afluente passará por oito floculadores, quatro decantadores, dez filtros e desinfecção.

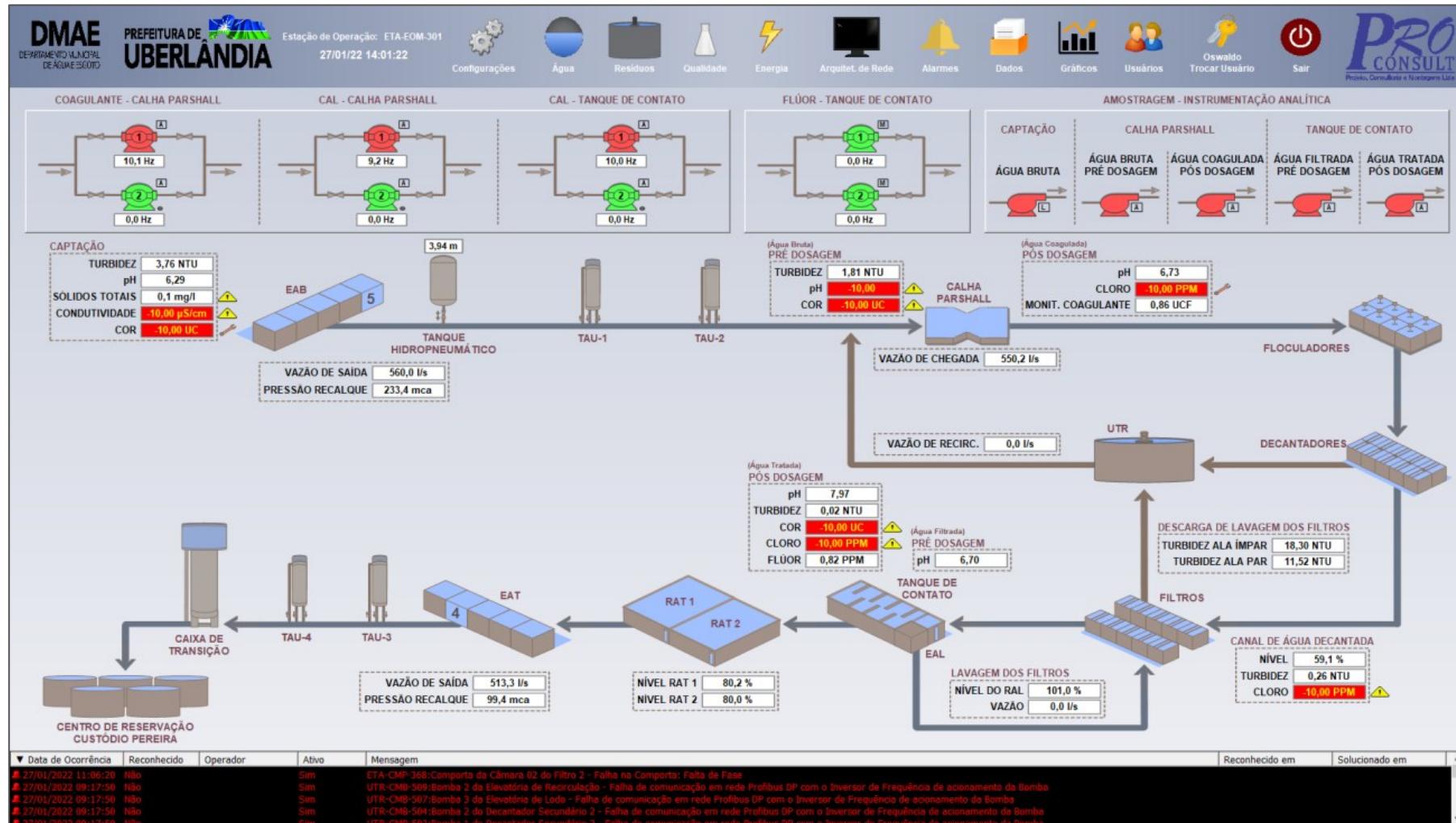
Figura 2 – Vista aérea ETA Capim Branco



Fonte: Google maps, 2024.

O complexo Capim Branco é todo controlado de forma automatizada através de um painel de telemetria (Figura 3), onde é possível controlar todo o sistema de comportas, bombas, além de verificar os parâmetros de qualidade da água. Além disso, a ETA conta com o diferencial de uma Unidade de Tratamento de Resíduos – UTR, responsável pela desidratação do lodo gerado na estação. A UTR é composta por dois decantadores secundários, dois adensadores de lodo, um tanque de equalização e duas centrífugas. A água separada do lodo nos tanques é enviada a um reservatório de recirculação e direcionada ao início do processo em que será tratada novamente. O lodo, por sua vez, é desidratado, acondicionado em caçambas e destinado ao Aterro Sanitário da cidade. Estima-se que o sistema Capim Branco gere em torno de 100 ton/mês de lodo.

Figura 3 – Painel de Telemetria ETA Capim Branco com detalhamento dos tanques existentes



Fonte: DMAE, 2023.

2.1.1 Coleta de Lodo da ETA Capim Branco

Inicialmente, foi feita a coleta do lodo diretamente das caçambas localizadas na Estação de Tratamento de Água Capim Branco. Para a coleta, utilizou-se um recipiente adaptado no formato de pá, devidamente limpo e higienizado para evitar qualquer contaminação por produtos químicos. A coleta foi feita em 5 pontos específicos da caçamba (Figura 4) para garantir a homogeneidade da amostra, visto que havia a presença de água em uma das extremidades da caçamba. O lodo foi acondicionado em sacos plásticos com fecho *ziplock* de dimensões 24 x 36 cm. Em cada saco plástico foi coletado 1 kg de lodo.

Foram realizadas 5 coletas com 5 kg de lodo em cada, ou seja, 5 sacos plásticos. As coletas foram feitas nos dias 18 de agosto; 09 de outubro; 07 de novembro; 11 de dezembro de 2023 e 16 de janeiro de 2024. Após as coletas, o lodo ficou fechado e mantido em temperatura ambiente no Laboratório de Microbiologia (LAMIC) da Universidade Federal de Uberlândia

Figura 4 – Locais de coleta de lodo centrifugado para garantir homogeneidade da coleta



Fonte: o autor, 2023.

2.1.2 Caracterização do lodo da ETA Capim Branco

O lodo da ETA teve suas variáveis físico-químicas determinadas (Tabela 2). É importante ressaltar que as análises foram feitas após os 10 dias de desidratação do lodo com incidência de luz solar, sem presença de chuva em campo aberto (Figura 31). Dessa forma, a densidade registrada no relatório difere da densidade média obtida na Etapa 1 deste estudo, uma vez que corresponde a um estágio distinto de umidade do lodo.

Tabela 2 – Análise e caracterização do lodo da ETA Capim Branco após 10 dias de secagem em tempo aberto com incidência solar e sem presença de chuva

Análise	Resultado em umidade natural		Extrator ou referência
pH	7,3		-
Densidade (g cm ⁻³)	0,78		-
Nitrogênio Total (%)	1,5		-
Carbono Orgânico (%)	5,22		Espectrofotometria
Matéria Orgânica (%)	9,0		Espectrofotometria
Relação C/N	17/1		-
Fósforo (mg.dm ⁻³)	17,96		Mehlich-1
Potássio (cmol _c)	0,13		Mehlich-1
Cálcio (cmol _c)	2,20		KCL 1mol L ⁻¹
Magnésio (cmol _c)	0,50		KCL 1mol L ⁻¹
Enxofre (mg.dm ⁻³)	7,0		Fosfato Monobásico de Cálcio
Boro (mg .dm ⁻³)	0,52		Água quente
Cobre (mg dm ⁻³)	1,90		DTPA
Ferro (mg dm ⁻³)	6,0		DTPA
Manganês (mg dm ⁻³)	5,0		DTPA
Zinco (mg dm ⁻³)	0,70		DTPA
H+Al (cmol _c)	3,83		SMP a pH 7,5
CTC (cmol _c)	2,83		-
Textura			
Areia (g.kg ⁻¹)	850		
Silte (g.kg ⁻¹)	50		Densímetro
Argila (g.kg ⁻¹)	100		

Fonte: O autor, 2024.

2.2 Ensaio com Lodo de ETA como substrato para mudas

Cinco tratamentos foram montados, em função do volume, com concentrações de lodo de 0%, 12,5%, 25%, 50%, 75% misturados com substrato comercial para mudas (Tabela 3), em 6 repetições, totalizando 30 unidades amostrais. O substrato comercial foi o da marca Biomix, recomendado para a formação de mudas e plantio orgânico, composto por: Casca de pírus moída e compostada, fibra ou pó de coco (informações descritas na embalagem) (Tabela 4). O lodo foi coletado entre agosto de 2023 e janeiro de 2024 da ETA Capim Branco, localizada na cidade de Uberlândia, MG. O ensaio foi instalado em 14 abril de 2024 e finalizado (separação entre solo e planta e levado para análise) em 24 de setembro de 2024, com 160 dias de condução.

Tabela 3 – Percentagens de concentração de LETA e substrato para formação do ensaio para análise do crescimento de mudas de Ipê-de-jardim

Tratamento	Lodo	Substrato Comercial
TC (controle)	0%	100%
T1	12,5%	87,5%
T2	25%	75%
T3	50%	50%
T4	75%	25%

Fonte: O autor, 2024.

Tabela 4 – Composição do substrato comercial informada na embalagem.

Substrato	Características Químicas					Aplicação	Composição
	CE (mS/cm)	CRA (%)	U (%)	D (kg/m ³)	pH		
BIOMIX	0,4	55	45	400	6,2	Cultivo de mudas e plantio orgânico	Casca de pírus moída e compostada, fibra ou pó de coco

Fonte: informado pelo fornecedor (embalagem)

CE: condutividade elétrica

CRA: Capacidade de Retenção de Água

U: Umidade

D: Densidade

2.3 Preparação das amostras de mudas

Para suporte do material (lodo, substrato e sementes), foi utilizado um vaso para mudas feitos de plástico em formato de tronco de cone com as dimensões: 12 cm de altura, 12 cm de largura (boca) e 10 cm de largura (base); e volume de 1 litro. Os recipientes chegaram com furos nas laterais e fundo sem furos, dessa forma, os buracos laterais foram fechados com fita crepe e com o auxílio de uma faca foram feitos 6 furos na base para não haver acúmulo de água no fundo do recipiente (Figura 5).

Figura 5 – Recipientes para substratos devidamente preparados tampando as laterais e abrindo 6 furos no fundo para a drenagem da água de irrigação



Fonte: O autor, 2024.

Com os recipientes prontos, o passo seguinte foi a preparação do substrato. No dia 14 de abril de 2024, foram preparados 5 tratamentos (Tabela 3) com 6 repetições para cada, totalizando 30 unidades experimentais. Cada tratamento conta com uma certa quantidade de substrato comercial, adquirido em loja de jardinagem e um complemento de lodo.

Grande parte dos estudos consultados e disponíveis na literatura utilizam um lodo desidratado em estufas e moído. No entanto, o objetivo desta etapa de estudo é a utilização do lodo *in natura*, ou seja, conforme coletado na estação, sem tratamentos prévios, além do já atribuído na Unidade de Tratamento de Resíduos.

Para a preparação das amostras foram selecionados, ao acaso, 2 sacos plásticos com fecho *ziplock* de cada coleta e homogeneizados por cerca de 20 minutos. Em seguida, com o auxílio de um balde, foi feita a homogeneização para cada tratamento, conforme quantidade de cada material (Figura 6). Para a medição da quantidade do material, foi utilizada uma proveta

de 1000 ml (Figura 7). Adotou-se o volume, como parâmetro, em função da diferença de densidade entre os materiais utilizados.

Figura 6 – Processo de homogeneização dos tratamentos (progressão de adição de lodo) para a avaliação do crescimento de mudas de ipê-de-jardim no ensaio com diferentes concentrações de lodo (0%, 12,5%, 25%, 50% e 75%)



Fonte: O autor, 2024.

Figura 7 – Proveta de 1000 ml para medição do volume de substrato comercial a ser utilizado nos tratamentos para avaliação do crescimento de mudas de ipê-de-jardim



Fonte: O autor, 2024.

Para a homogeneização dos tratamentos foi considerado, proporcionalmente, o volume total das 6 repetições mais 20% como volume de segurança.

Cada vaso de mudas tem capacidade de 1 litro, porém, foram preenchidos com 900 ml de substrato, ficando cerca de 2 cm da borda (Figura 8). Dessa forma, os vasos foram preparados com as seguintes configurações:

- TC: 900 ml de substrato comercial.
- T1: 787,5 ml de substrato comercial + 112,5 ml de lodo de ETA.
- T2: 675 ml de substrato comercial + 225 ml de lodo de ETA.
- T3: 450 ml de substrato comercial + 450 ml de lodo de ETA.
- T4: 225 ml de substrato comercial + 675 ml de lodo de ETA.

Figura 8 – Exemplo de vaso preenchido (amostra) onde foram distribuídas as sementes de ipê-de-jardim para ensaio com diferentes concentrações de LETA e avaliação do crescimento de mudas



Fonte: O autor, 2024.

Após a montagem do substrato, foram feitos 4 orifícios de 1 cm de profundidade e 1 cm de diâmetro, com adição de 1 semente de *Tecoma stans* (ipê-de-jardim) em cada cova (Figura 9). As sementes utilizadas foram doadas pelo Horto Municipal de Uberlândia e não tiveram procedência conhecida. O lote doado foi feito por coleta aleatória realizada em toda a cidade, sem seleção de plantas matrizes para identificação de sua procedência. Após a introdução da semente, os orifícios foram fechados. O critério para a seleção da espécie foi ser uma planta de fácil germinação, desenvolvimento em ambientes pobres em nutrientes e crescimento durante todo o ano.

Figura 9 – Semeadura das amostras com sementes de Ipê-de-jardim em ensaio com doses crescentes de lodo de 0%, 12,5%, 25%, 50% e 75%



Fonte: O autor, 2024.

Cada unidade experimental foi semeada com quatro sementes de *Tecoma stans* e foi avaliada a quantidade de sementes que germinaram em relação à quantidade total de sementes plantadas em cada tratamento para a obtenção da taxa de germinação.

Após a montagem das parcelas (Figura 10), os 30 vasos foram identificados (Figura 11 e Figura 12) e transportados para o viveiro do Departamento Municipal de Água e Esgoto de Uberlândia, localizado na Estação de Tratamento de Água Bom Jardim, onde ficaram em contato com o sol e com irrigação automática. A irrigação por aspersão (Figura 13) foi realizada diariamente às 07h00 e às 16h00, evitando horários mais quentes para reduzir a evaporação da água. A distribuição das mudas foi feita de acordo com o espaço do canteiro e as posições dos vasos foram definidas aleatoriamente a partir de sorteio (Tabela 5).

Figura 10 – Ensaio com diferentes concentrações de LETA (0%, 12,5%, 25%, 50% e 75%) pronto para destinação ao viveiro



Fonte: O autor, 2024.

Tabela 5 – Disposição dos ensaios no viveiro

Distribuição das Mudas no Viveiro							
TCD	T4D	T1A	T4C	T1F	T2A	T4B	T1E
T4F	T3B	TCE	T4E	T4A	TCF	T3D	TCA
T2B	T1C	T1D	T2E	T3A	T2C	T2F	
T3C	T1B	T3E	T2D	TCC	T3F	TCB	

Fonte: O autor, 2024.

Figura 11 – Identificação dos ensaios



Fonte: O autor, 2024.

Figura 12 – Disposição dos ensaios no viveiro do Programa Buriti – ETA Bom Jardim



Fonte: O autor, 2024.

Figura 13 – Irrigação por aspersão no viveiro do Programa Buriti – ETA Bom Jardim



Fonte: O autor, 2024.

As mudas foram monitoradas 2 vezes por semana para avaliação do desenvolvimento das plantas. Mensalmente, foram retiradas as medidas de altura da planta germinada. Para essa medida, foi utilizado um Paquímetro Digital Fibra De Carbono 0,1 (150mm). As medidas de altura (crescimento) da planta foram feitas a partir do colo da planta até a inserção do pecíolo da folha mais jovem (Figura 14).

Figura 14 – Indicação de medição da altura das mudas de ipê-de-jardim se desenvolvendo em substrato com diferentes concentrações de LETA



Fonte: O autor, 2024.

Para avaliar o crescimento mensal das plantas, numerou-se cada semente com o referencial da etiqueta (Figura 15).

Figura 15 – Numeração das sementes em relação à etiqueta



Fonte: O autor, 2024.

O desenvolvimento das mudas durou 160 dias, durante o período de abril a setembro de 2024. Este período foi determinado em função do tempo médio para o crescimento de mudas antes de sua transposição para o solo e/ou comercialização ser de 150 dias (Figueiredo Neto, 2011).

Após os 160 dias de crescimento das plantas, as amostras foram levadas para o Laboratório de Microbiologia do Solo (LAMIC) da Universidade Federal de Uberlândia. No local foi feita a remoção das plantas dos vasos, limpeza com água e separação da parte aérea das raízes (Figura 16), posteriormente foi feita a pesagem da massa fresca da raiz e da parte aérea.

Figura 16 – Separação da parte aérea das raízes após passados os 160 dias de desenvolvimento das mudas em substratos com diferentes concentrações de LETA



Fonte: O autor, 2024.

Posteriormente, as plantas foram armazenadas e identificados em sacos de papel (Figura 17) e foi feita a secagem de todas as plantas (raiz e parte aérea) em estufa a 60°C até atingir peso constante (Figura 18).

Figura 17 – Plantas armazenadas para secagem



Fonte: O autor, 2024

Figura 18 – Estufa para secagem das plantas



Fonte: O autor, 2024.

2.4 Delineamento Experimental

Para esta pesquisa foi adotado o Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC). Com isso, as amostras foram devidamente identificadas e os tratamentos foram dispostos de maneira aleatória, sem o risco de favorecimento ou prejuízo de qualquer unidade experimental. Com a seleção do local de suporte dos vasos a irrigação, a incidência solar foi uniforme entre todos os tratamentos (Tabela 5).

2.5 Parâmetros avaliativos

Após os 160 dias de crescimento, foi realizada a coleta das mudas e a avaliação dos seguintes parâmetros.

- Taxa de Germinação ($G\%$): quantidade de mudas germinadas pelo total de sementes plantadas

$$G\% = \frac{n}{24} \times 100 \quad (\text{equação 1})$$

Sendo:

$G\%$: porcentagem de germinação

n : número de indivíduos germinados

- Taxa de sobrevivência ($S\%$): quantidade de mudas vivas pelo total de sementes germinadas

$$S\% = \frac{n}{g} \times 100 \quad (\text{equação 2})$$

Sendo:

$S\%$: porcentagem de sobrevivência

n : número de indivíduos vivos no momento da coleta

g : número de indivíduos germinados

- Crescimento radicular (R): Caracterizado por toda a parte subterrânea das plantas, medido com Paquímetro Digital Fibra De Carbono 0,1 (150mm).
- Altura (H): Caracterizado por toda parte aérea da planta, medido com Paquímetro Digital Fibra De Carbono 0,1 (150mm).
- Diâmetro (DC): Caracterizado pela parte da planta rente ao solo, medido com Paquímetro Digital Fibra De Carbono 0,1 (150mm).
- Biomassa da parte aérea: Avaliação da massa fresca e massa seca.

- i. Massa fresca: pesada assim que extraído.
- ii. Massa seca: pesada após acondicionamento das plantas em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C até atingir peso constante.
- g. Taxa de crescimento (H): O desenvolvimento da altura (H) foi acompanhado e medido a cada 30 dias a partir do 40º dia após o plantio. A taxa de crescimento foi calculada pela equação:

$$Tc_H = \frac{H}{t} \quad (\text{equação 3})$$

Em que:

Tc: Taxa de crescimento (cm/dia)

H: Altura da planta (cm)

t: Tempo de cultivo (dias)

2.6 Tratamento Estatístico

Os dados foram submetidos a análise de variância ANOVA normal e com transformações de dados (logarítmica e raiz quadrada). Porém, os resultados não atenderam ao princípio da normalidade. Com isso, foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis a 10% de significância. A opção pela significância de 10% se tornou necessária devido a quantidade pequena de repetições que gerou uma variação relativamente alta, para comparar os fatores. Para as análises estatísticas utilizou-se o software R.

2.7 Índices de Qualidade e Índice de Qualidade de Dickson (IQD)

2.7.1 Índices de Qualidade das Mudas

A determinação da qualidade das mudas foi feita a partir de índices de correlação das análises morfológicas das mudas. Para isso, analisou-se o quociente dos atributos das plantas.

- a. Relação entre altura da parte aérea (H) e diâmetro do coleto (DC): R_{HDC} .
- b. Relação entre altura da parte aérea (H) e massa da matéria seca da parte aérea (MSPA): R_{HMSPA} .
- c. Relação entre a massa da matéria seca da parte aérea (MSPA) e a massa da matéria seca da raiz (MSR): R_{MSPAMS} .

2.7.2 Índice de Qualidade de Dickson (IQD)

O IQD é considerando um dos melhores parâmetros para se avaliar a qualidade de mudas. Quanto maior o valor deste indicador, maiores são as chances de manutenção e perpetuação das mudas no ambiente. O índice de Dickson é uma fórmula que contempla vários parâmetros morfológicos levando em consideração a biomassa total seca, tanto a parte aérea quanto a raiz (Silva *et al.*, 2024).

O Índice de Qualidade de Dickson é calculado a partir da equação abaixo:

$$IQD = \frac{MST}{\frac{H}{DC} + \frac{MSPA}{MSR}} \quad (\text{equação 4})$$

Em que:

MST: Massa da matéria seca total (g)

H: Altura da parte aérea (cm)

DC: Diâmetro do coleto (mm)

MSPA: Massa da matéria seca da parte aérea (g)

MSR: Massa da matéria seca da raiz (g)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Taxa de germinação das mudas

Na primeira etapa, as sementes foram semeadas diretamente nos tratamentos já preparados, ou seja, nesta parte do experimento foi avaliada a taxa de germinação considerando a influência do lodo. A germinação ocorreu entre o oitavo e o trigésimo primeiro dia (Apêndice I). A partir do uso da equação 1 foi avaliada a quantidade de sementes que germinaram em relação à quantidade total de sementes plantadas em cada tratamento (Tabela 6).

Tabela 6 – Taxa de Germinação das Sementes de *Tecoma stans*

Tratamento	Quantidade Semeada	Quantidade Germinada	Taxa de Germinação
TC	24	14	58,3%
T1	24	12	50,0%
T2	24	15	62,5%
T3	24	2	8,3%
T4	24	1	4,2%
Total	120	44	36,7%

Fonte: O autor, 2024.

A taxa de germinação variou conforme a dosagem de lodo, porém, não de forma diretamente proporcional, sendo assim, sugere-se que há uma concentração limite de lodo que deve ser administrado a fim de ter uma melhor produtividade. Os tratamentos com maior taxa de germinação de sementes foram o controle sem lodo (58,3% de germinação), com 12,5% de lodo de ETA (50,0% de germinação), e com 25% de lodo (62,5% de germinação). O tratamento 3, com 50% de lodo e o 4, com 75% de lodo, com menores taxas de germinação indicam efeito deletério para germinação de sementes do ipê-de-jardim.

Tratamentos na faixa de 30% de lodo tendem a apresentar melhores resultados de germinação de *Handroanthus impetiginosus*, bem como concentrações maiores tendem a reduzir a taxa de emergência das sementes (Cunha *et al.* 2020). Além disso, concentrações acima de 50% de LETA para a formação de mudas de *Eucalyptus urograndis* tendem a não ser viáveis (Rocha *et al.*, 2015). Portanto, reforça-se que doses de lodo de ETA maiores de 50% no substrato prejudicam a germinação ou o crescimento vegetal, mesmo variando a espécie vegetal e a origem do LETA.

Outro fator, que pode ter influenciado na germinação, seria o LETA ter estimulado um ambiente menos óxico, por conta da anaerobiose. A anaerobiose é quando a planta, especialmente, suas raízes, está sujeita a um ambiente com déficit de oxigênio. Este processo pode ser consequência do encharcamento do solo por meio de inundações ou da retenção de água em excesso (baixa drenagem), compactação do solo ou aumento da concentração de matéria orgânica em decomposição. Nestes ambientes, as plantas perdem sua capacidade de respiração aeróbica sendo necessária a adaptação metabólica para sobreviver (Arru *et al.*, 2014). Para evitar este problema em futuros experimentos, indica-se o uso do lodo desidratado por pelo menos 10 dias a céu aberto para a montagem do sistema LETA/substrato.

As plantas submetidas a anaerobiose tendem a apresentar características específicas, visualmente constatadas neste experimento, como folhas amareladas e/ou murchas (mesmo com solo úmido) e crescimento lento ou atrofiado (Arru *et al.*, 2014). Os tratamentos T3 com 50% de lodo e T4 com 75% de lodo apresentaram as características típicas de plantas submetidas a um ambiente em anaerobiose (Figura 19).

Figura 19 – Possíveis sinais de anaerobiose nas plantas cultivadas nos tratamentos com grande presença de lodo T3 (50% lodo) e T4 (75% de lodo)



Fonte: O autor, 2024.

O lodo de ETA apresenta agentes coloidais que atuam como agregantes, além de propriedades físicas que contribuem para a melhoria da estrutura do solo, sendo um fator importante para a retenção de água no solo (Colino, 2006). Com isso, grandes quantidades de lodo misturados ao solo podem contribuir para a formação da anaerobiose. Para a germinação, as sementes necessitam de grandes quantidades de oxigênio, ou seja, sob anaerobiose as sementes podem recorrer a processos de fermentação, gerando menos energia e, ainda, produzir compostos tóxicos, prejudicando a sua germinação ou podem, inclusive, morrer devido ao estresse prolongado pelo excesso de água e redução no oxigênio (Arru *et al.*, 2014).

Sementes de *Parapiptadenia rigida* e *Cedrela fissillis* submetidas a anaerobiose tendem a apresentar uma queda em sua taxa de germinação (Marques *et al.*, 1992). O lodo foi utilizado *in natura*, sem preparação prévia, com teor de umidade do lodo centrifugado entre 84 e 88%. Foi visto, após a montagem dos ensaios com maior quantidade de lodo (T3, 50% e T4, 75%), que a composição (lodo + substrato) ficou com uma consistência plástica e pegajosa, o que

sugere menor macroporosidade (poros maiores que 50 μm) e maior capacidade de retenção de água, favorecendo a anaerobiose (Figura 20). Adicionalmente, T3 (50%) e T4 (75%) apresentaram massa agregada contínua na superfície da mistura substrato-lodo após alguns dias no viveiro (Figura 21), criando certa resistência para a emergência das sementes. Após o 39º dia, não houve mais germinações.

Figura 20 – Tratamentos T3 (50% lodo) e T4 (75% lodo) após o preparo apresentando consistência plástica e pegajosa quando úmida



Fonte: O autor, 2024.

Figura 21 – Exemplos de amostras T3 (50% de lodo) e T4 (75% de lodo) endurecidas após poucos dias no viveiro, em contato com irrigação e sol.



Fonte: O autor, 2024.

3.2 Taxa de sobrevivência

Para esta análise foram consideradas apenas as plântulas que germinaram. Dessa forma, foi evidenciado que 100% das sementes que germinaram continuaram a crescer e se desenvolver. Isso é retratado no Apêndice I onde é possível ver que não houve redução no número de brotos com o passar do tempo. Estudos utilizando o lodo da ETA de Xique-Xique (BA) apresentaram 100% de sobrevivência na formação de mudas de *Cnidoscolus quericolius* (Brito *et al.*, 2021). Uma taxa acima de 84% de sobrevivência é considerada alta (Figueiredo Neto, 2011). Houve variações no padrão de crescimento, porém, todas as medições apresentaram progresso neste aspecto, o que indica a sobrevivência das plântulas em todas as variações de concentração de lodo. Tal fato sugere que o lodo não é prejudicial a ponto de matar a vegetação.

3.3 Parâmetros de medidas

Ao final do processo de crescimento das mudas, os dados foram medidos e as médias das variáveis foram calculadas (Tabela 7). Foram medidos a altura da muda (H), o diâmetro do coleto (DC) e a biomassa das plantas (massa seca – MS; massa fresca – MV).

Analizando os resultados obtidos, verifica-se que os melhores resultados visuais de crescimento e desenvolvimento das mudas foram a partir do tratamento T2, com 25% de lodo, o que indica que, para a espécie *Tecoma stans*, esta quantidade de lodo, misturado ao substrato, contribui para o desenvolvimento da planta.

Tabela 7 – Medidas observadas ao final dos 160 dias de crescimento das mudas

Tratamento	Altura – H (cm)	Diâmetro do coleto – DC (cm)	Massa fresca da parte aérea – MVPA (g)	Massa fresca da raiz – MVR (g)	Massa seca da parte aérea – MSPA (g)	Massa seca da raiz – MSR (g)
TC (controle)	4,556	0,219	0,235	0,610	0,176	0,269
T1 (12,5% lodo)	5,770	0,274	0,559	2,286	0,302	0,599
T2 (25% lodo)	6,186	0,277	0,653	4,220	0,428	1,083

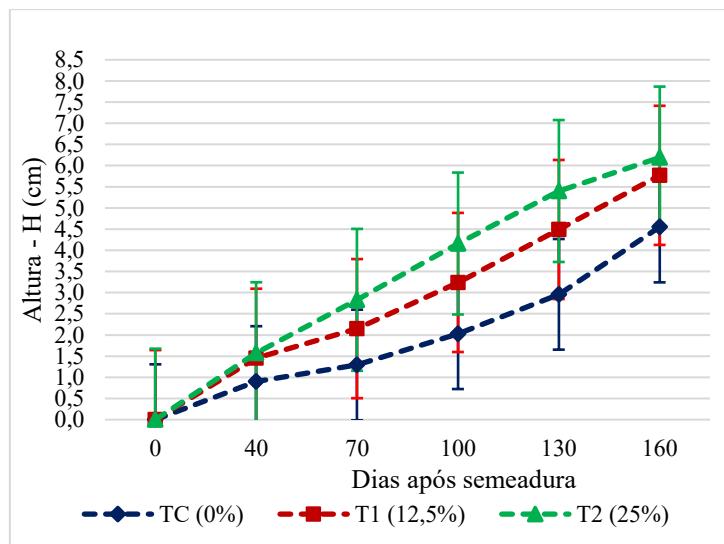
Fonte: o autor, 2025.

3.3.1 Crescimento das plântulas

Dentre os tratamentos estatisticamente analisáveis, T1, com 12,5% de lodo, e T2, com 25% de lodo misturados ao substrato comercial, apresentaram maior crescimento médio (5,7 e 6,1 cm de altura, respectivamente) em comparação ao TC (tratamento controle com 0% de lodo)

com apenas o substrato comercial (4,5 cm de altura), indicando o potencial de uso do lodo para a formação de mudas de *Tecoma stans* (Figura 22). Entretanto, após as análises estatísticas, foi verificado que T1 e T2 não apresentam diferenças estatísticas (Tabela 8), bem como T1 e TC; contudo, o tratamento T2 apresentou-se diferente de TC indicando potencial de utilização de 25% de lodo misturado ao substrato para o crescimento das plantas. Os tratamentos T3, com 50% de lodo, e T4, com 75% de lodo, não apresentaram repetições o suficiente para o fomento das estatísticas e medidas de desvio padrão. No tratamento T3 (50% de lodo), houve duas germinações e em T4 (75% de lodo), apenas uma.

Figura 22 – Altura média medida de *Tecoma stans* para os tratamentos TC: 0% lodo; T1: 12,5% lodo; T2: 25% lodo



Fonte: O autor, 2024.

Tabela 8 – Análises estatísticas de Média, Desvio Padrão e Mediana da variável altura (H) a partir do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis

Tratamento	Média (cm)	Desvio Padrão (cm)	Mediana - Q50 (cm)	p-valor
TC (controle)	4,556	1,204	4,336 b	0,0773
T1 (12,5% lodo)	5,770	1,563	5,170 ab	
T2 (25% lodo)	6,186	2,139	5,499 a	

Fonte: o autor, software R, 2025.

As observações visuais apontaram, também, que o substrato comercial utilizado para o preparo dos tratamentos apresentou baixa capacidade de retenção de umidade, visto que, em dias ensolarados, cerca de 4 horas após a irrigação, o ensaio já estava seco, enquanto os tratamentos com lodo apresentavam leve umidade. Outra característica observada é a grande

aeração do composto, mesmo após a irrigação, notou-se pouca agregação. Tais fatos podem ter acarretado a dificuldade de crescimento das plantas nos tratamentos de controle. Além disso, as observações sugerem que a presença do lodo pode ter auxiliado no processo de retenção de umidade e agregação do solo, proporcionando maior crescimento das plântulas, quando em comparação ao tratamento sem a presença do lodo.

Para a determinação da taxa de crescimento foi utilizado a equação 3 (Tabela 9).

Tabela 9 – Taxa de crescimento das plântulas do 40º ao 160º dia após a semeadura

Tratamento	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	Taxa de Crescimento	Desvio Padrão
	40º dia	70º dia	100º dia	130º dia	160º dia		
TC (controle)	0,90 b	1,29 b	2,03 b	2,96 b	4,55 b	0,028 <i>cm. dia⁻¹</i> b	0,0075
T1 (12,5% lodo)	1,45 ab	2,15 a	3,24 a	4,49 a	5,77 ab	0,036 <i>cm. dia⁻¹</i> ab	0,0098
T2 (25% lodo)	1,57 a	2,83 a	4,16 a	5,41 a	6,19 a	0,038 <i>cm. dia⁻¹</i> a	0,0134

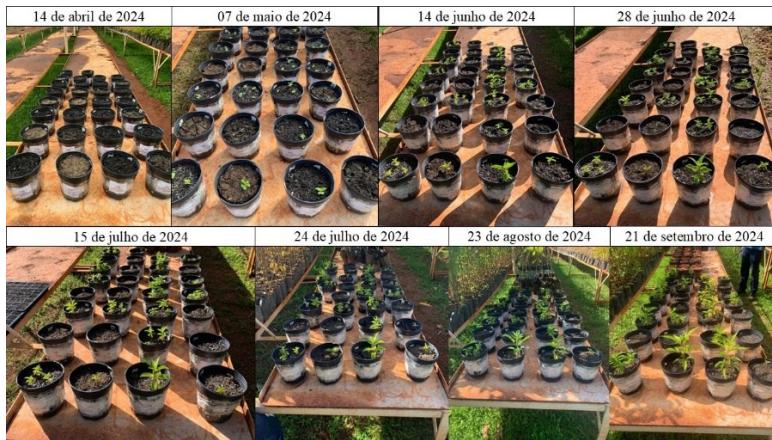
As letras minúsculas indicam a diferença estatística entre os tratamentos a partir do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ($p<0,1$)

Fonte: O autor, 2024.

Os tratamentos T1 (12,5% de lodo) e T2 (25% de lodo) apresentaram crescimento e taxa de crescimento estatisticamente iguais não havendo, portanto, diferença significativa em relação à concentração de lodo na taxa de crescimento entre os tratamentos. No entanto, a taxa de crescimento do tratamento T2 (25% de lodo) foi maior em relação ao tratamento TC (sem lodo).

A evolução no crescimento das plantas no viveiro do Dmae foi acompanhada e registrada desde a semeadura até o 160º dia (Figura 23).

Figura 23 – Evolução do crescimento das plântulas do dia da semeadura até o 160º dia do ensaio com substratos formados por diferentes concentrações de LETA



Fonte: O autor, 2024.

3.3.2 *Diâmetro do Coleto*

Para o diâmetro do coleto não houve diferenças significativas para os tratamentos a 10% de significância (Tabela 10).

Tabela 10 – Análises estatísticas de Média, Desvio Padrão e Mediana da variável Diâmetro do Coleto (DC) a partir do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis

Tratamento	Média (cm)	Desvio Padrão	Mediana - Q50 (cm)	p-valor
TC (controle)	2,192	0,512	2,447 a	0,1315
T1 (12,5% lodo)	2,738	0,550	2,533 a	
T2 (25% lodo)	2,772	0,424	1,819 a	

Fonte: o autor, software R, 2025.

3.3.3 *Massa fresca e massa seca da parte aérea*

Ao analisar a massa fresca da parte aérea, os tratamentos T1 (12,5% lodo) e T2 (25% lodo) não apresentaram diferença, porém, ambos se mostraram estatisticamente diferentes do tratamento controle TC (0% lodo), indicando o potencial do lodo em auxiliar no processo de crescimento da massa foliar das plantas submetidas à estas concentrações do resíduo. Ambos os tratamentos apresentaram média de massa maior que o tratamento com 100% de substrato comercial (Tabela 11).

Tabela 11 – Análises estatísticas de Média, Desvio Padrão e Mediana da variável Massa Fresca da Parte Aérea (MVPA) a partir do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis

Tratamento	Média (g)	Desvio Padrão	Mediana - Q50 (g)	p-valor
TC (controle)	0,235	0,126	0,204 b	0,0679
T1 (12,5% lodo)	0,559	0,447	0,416 a	
T2 (25% lodo)	0,653	0,737	0,314 a	

Fonte: o autor, software R, 2025.

A massa seca, por outro lado, não apresentou diferenças estatísticas entre os tratamentos a 10% de significância (Tabela 12). Este fator pode indicar que a presença do lodo, como substrato, pode auxiliar a planta na retenção de água, uma vez que, com a presença da água, (massa fresca) houve diferença entre os tratamentos à medida que, após a secagem, os tratamentos se apresentaram estatisticamente iguais.

Tabela 12 – Análises estatísticas de Média, Desvio Padrão e Mediana da variável Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) a partir do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis

Tratamento	Média (cm)	Desvio Padrão (cm)	Mediana - Q50 (cm)	p-valor
TC (controle)	0,176	0,113	0,136 a	0,1315
T1 (12,5% lodo)	0,302	0,185	0,234 a	
T2 (25% lodo)	0,428	0,496	0,197 a	

Fonte: o autor, software R, 2025.

3.3.4 *Massa fresca e massa seca da raiz*

Por fim, ao analisar estatisticamente a massa fresca da raiz, foi constatada diferença entre os três tratamentos. O tratamento T2 (25% de lodo) apresentou maior média de massa fresca que os demais tratamentos, indicando melhor desenvolvimento da raiz quando em contato com o lodo de ETA (Tabela 13).

Tabela 13 – Análises estatísticas de Média, Desvio Padrão e Mediana da variável Massa Fresca da Raiz (MVR) a partir do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis

Tratamento	Média (cm)	Desvio Padrão (cm)	Mediana - Q50 (cm)	p-valor
TC (controle)	0,610	0,763	0,274 c	0,0049
T1 (12,5% lodo)	2,286	2,373	1,236 b	
T2 (25% lodo)	0,610	1,775	3,732 a	

Fonte: o autor, software R, 2025.

Já a massa seca da raiz apresentou, ainda, diferenças estatísticas no tratamento T2 (25% de lodo) em comparação com os demais tratamentos (TC e T1, 0 e 12,5% lodo respectivamente), os quais não apresentaram diferença estatística (Tabela 14). Maiores médias de massas de matéria seca nas raízes sugerem uma maior porcentagem de sobrevivência em campo, já que este parâmetro indica a presença de raízes fibrosas, o que proporciona uma melhor capacidade de continuidade do crescimento e de formação de novas raízes, o que contribui para a resistência da planta em ambientes extremos (Figueiredo Neto, 2011).

Tabela 14 – Análises estatísticas de Média, Desvio Padrão e Mediana da variável Massa Seca da Raiz (MSR) a partir do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis

Tratamento	Média (cm)	Desvio Padrão (cm)	Mediana - Q50 (cm)	p-valor
TC (controle)	0,269	0,227	0,182 b	0,0058
T1 (12,5% lodo)	0,599	0,069	0,543 b	
T2 (25% lodo)	1,083	0,621	0,813 a	

Fonte: o autor, software R, 2025.

3.4 Redução

Outro aspecto analisado foi a redução de massa após a secagem (Tabela 15). Esta avaliação simula cenários de déficit hídrico em ambiente de campo, sendo que as mudas que evidenciam maior tolerância à secagem artificial indicam potencial superior de adaptação e sobrevivência sob condições de solo e clima adversos (Figueiredo Neto, 2011).

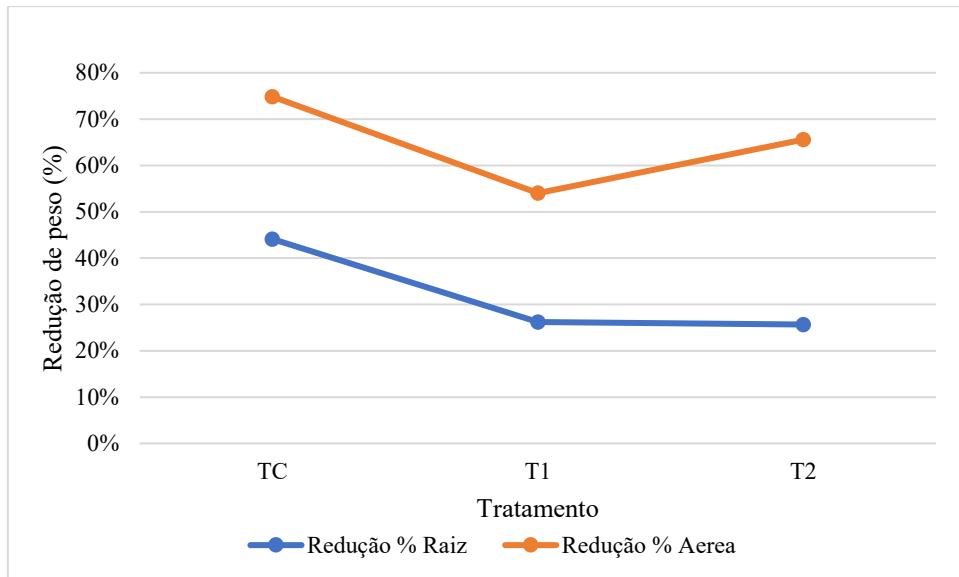
Tabela 15 – Porcentagem de redução de massa fresca a massa seca após estufa a 60 °C

Tratamento	Redução %	
	Parte Aérea	Raiz
TC (controle)	75%	44%
T1(12,5% lodo)	54%	26%
T2 (25% lodo)	66%	26%

Fonte: o autor, 2025.

O tratamento controle, sem a presença de lodo, apresentou maiores percentagens de redução (Figura 24) o que indica que uma certa vulnerabilidade da espécie a condições de campo adversas. Já os tratamentos com a presença de lodo apresentaram menor porcentagem de redução indicando que o resíduo pode auxiliar no desenvolvimento das mudas em condições desfavoráveis.

Figura 24 – Porcentagem de redução de massa seca em relação à massa fresca em cada um dos tratamentos



Fonte: o autor, 2025.

3.5 Índices de Qualidade

Os padrões de qualidade têm como finalidade estabelecer parâmetros de referência para as características das plantas após o transplantio em campo, destacando atributos como a capacidade de resistência a condições ambientais adversas.

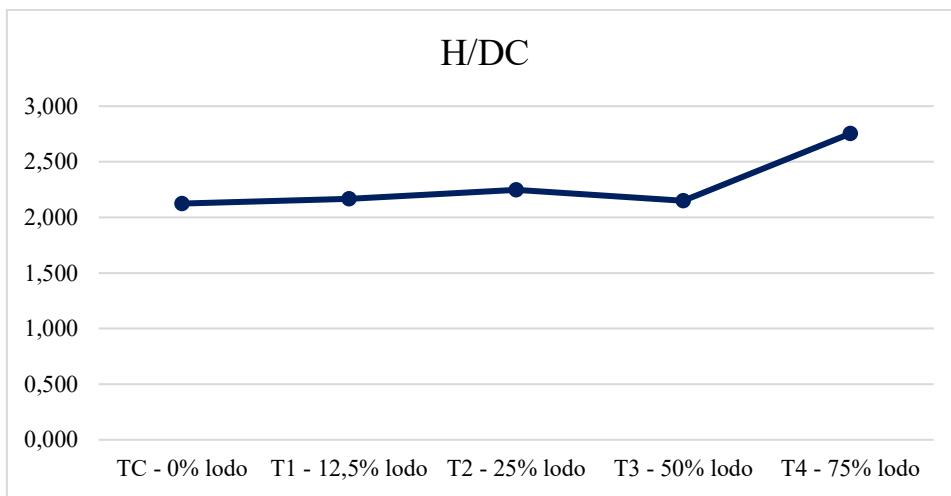
3.5.1 Relação da altura da parte aérea / diâmetro do coleto (RHDC)

Este índice expressa o perfil morfológico da parte aérea da planta, exprimindo o equilíbrio no crescimento e sua robustez. Dessa forma, valores menores de RHDC indicam uma maior capacidade de sobrevivência em campo. Porém, valores muito baixos indicam um crescimento reduzido em altura, o que pode prejudicar na competição por sol em plantas pioneiros, além disso, valores muito altos de RHDC implicam em um maior crescimento em altura em relação ao diâmetro do coleto, o que pode comprometer o desenvolvimento desta muda em campo. (Figueiredo Neto, 2011).

Neste ensaio observa-se uma linearidade entre os tratamentos, ou seja, pouca variação em função do tratamento (Figura 25), o que mostra que a adição do lodo não influencia no desenvolvimento da planta. Valores entre 2 e 4, como os encontrados neste experimento,

apresentam maior robustez, melhor relação entre parte aérea e raiz e melhor desempenho em campo, especialmente em condições de seca (Dixit; Burney, 2024).

Figura 25 – Gráfico da relação entre a altura da parte aérea e o diâmetro do coleto (H/DC) em cada tratamento

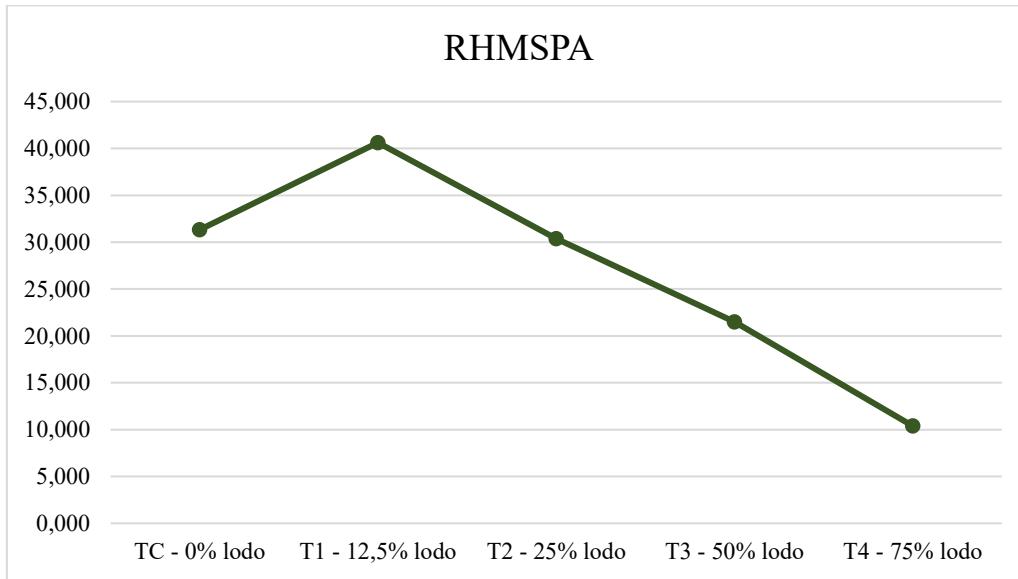


Fonte: O autor, 2025.

3.5.2 Relação da altura da parte aérea / massa da matéria seca da parte aérea (RHMSPA)

A relação entre a altura da parte aérea e o peso da matéria seca da parte área indica o potencial de sobrevivência em campo, quanto menor o resultado, melhor deverá ser sua sobrevivência (Figueiredo Neto, 2011). Com exceção da primeira dosagem (T1, 12,5% lodo), há uma tendência à redução no valor desta relação conforme aumento da concentração de lodo (Figura 26), sugerindo um potencial de melhora na capacidade de sobrevivência da *Tecoma stans* em campo.

Figura 26 – Relação entre altura da parte aérea e a massa seca da parte aérea (H/MSPA)



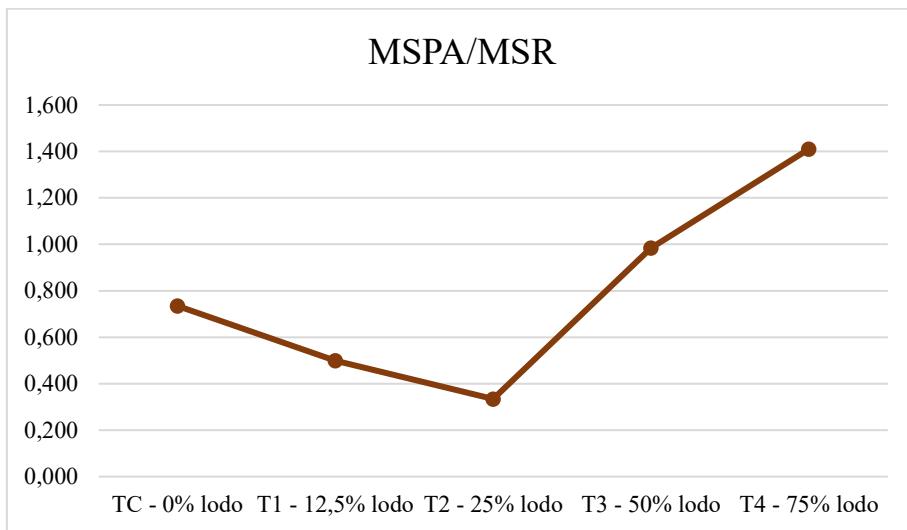
Fonte: O autor, 2025.

3.5.3 Relação entre a massa da matéria seca da parte aérea / massa da matéria seca da raiz (MSPA:MSR)

A relação entre a massa da matéria seca da parte aérea e a massa da matéria seca das raízes indica o equilíbrio fisiológico da planta entre o crescimento acima e abaixo do solo, valores entre 1 e 2 indicam equilíbrio funcional, favorecendo a adaptação pós plantio (Figueiredo Neto, 2011).

No ensaio com *Tecoma stans*, verificam-se números variando entre 0,3 e 1,4. Os tratamentos com concentração superior a 50% (T3 e T4) de lodo apresentaram um aumento nesta relação (Figura 27), indicando que a presença do lodo em concentrações superiores a 50% acarreta uma redução do crescimento da raiz, podendo ser, o LETA, um limitador deste crescimento.

Figura 27 – Relação entre a massa da matéria seca da parte aérea / massa da matéria seca da raiz (MSPA/MSR)



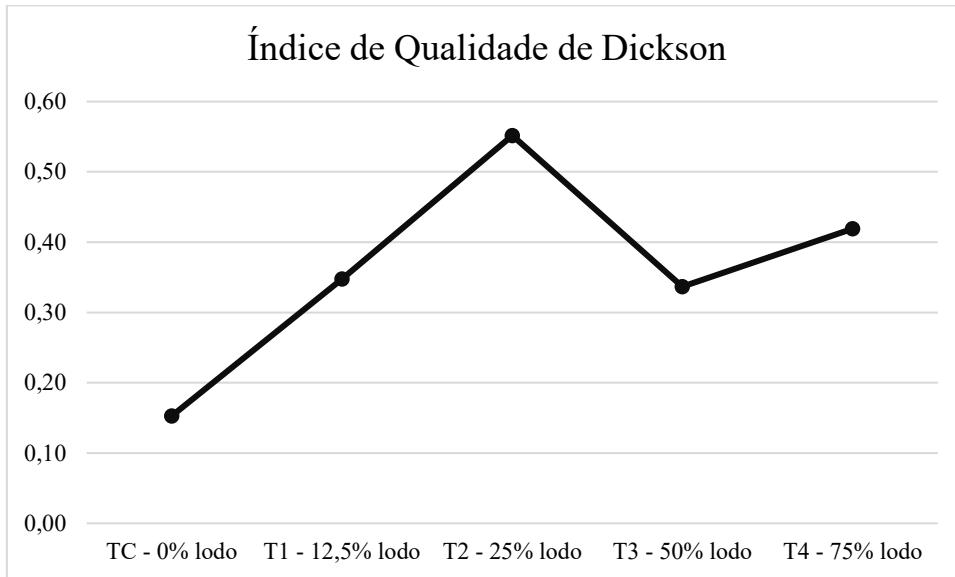
Fonte: O autor, 2025.

3.6 Índice de Qualidade de Dickson (IQD)

Para se evitar selecionar mudas muito altas e fracas ou pequenas, mas com boa capacidade de campo (robustez), é importante não avaliar os parâmetros isoladamente. Com isso, se destaca o Índice de Qualidade de Dickson (IQD). Para o cálculo de IQD são levados em consideração a robustez e o equilíbrio da distribuição da biomassa nas mudas, dessa forma, este índice se torna um bom indicador da qualidade das mudas, visto que são empregados parâmetros importantes para a avaliação da qualidade das plantas (Fonseca, *et al.*, 2002).

O valor mínimo do IQD, para uma muda ser considerada de boa qualidade, é de 0,20, variando entre 0,2 e 1,0, para qualidade moderada a boa, e acima de 1,0, para ser considerada de excelente qualidade (Massad, *et al.*, 2015). Neste ensaio, houve um crescimento do índice entre as concentrações de 0 a 25% de lodo, o que indica que o tratamento T2 (25% de lodo), com IQD 0,55 (Figura 28), como a concentração ideal para o crescimento das mudas, corroborando com os valores já apresentados de germinação, crescimento, diâmetro e massa.

Figura 28 – Índice de Qualidade de Dickson



Fonte: O autor, 2025.

4 CONCLUSÕES

O lodo da estação de tratamento de água (LETA) é útil para melhor formação de mudas de ipê-de-jardim (*Tecoma stans*), sendo o uso como substrato de desenvolvimento de plantas um bom destino deste resíduo.

A recomendação de uso para a melhor germinação, crescimento e desenvolvimento de mudas de *Tecoma stans* é de 25% de LETA. O uso de 25% de LETA aumentou a massa fresca da parte aérea (MVPA), massa fresca da raiz (MVR) e massa seca da raiz (MSR), e diminuiu a porcentagem de redução de massa fresca para massa seca após secagem. Indica-se, portanto, que o LETA se comporta como condicionador de substrato para resistência vegetal a períodos de seca e ou redução de disponibilidade de água. A concentração de 12,5% também estimula o desenvolvimento, mas em menor intensidade. As concentrações de 12,5% e 25% promoveram os índices de qualidade das mudas, indicando garantia de robustez e desempenho em campo.

Concentrações de 50% e 75% de LETA são inviáveis, impactando o desenvolvimento das mudas desde a germinação.

Portanto, conclui-se que o uso do LETA pode trazer benefícios para o crescimento de mudas; no entanto, deve ser usado com cautela e em concentrações moderadas. Para confirmação dos efeitos e suporte para recomendação mais robusta, com melhor previsão dos

resultados, são necessários mais estudos com outros LETA, solos/substratos, épocas, climas e espécies vegetais. Adicionalmente, estudos de dinâmica de nutrientes no solo, física e biologia do solo podem ajudar a desvendar os mecanismos de promoção no crescimento de mudas, bem como as causas dos efeitos deletérios quando se usam doses mais altas.

REFERÊNCIAS

- ARRU L. *et al.* New insights into the metabolic and molecular mechanism of plant response to anaerobiosis. **International Review of Cell and Molecular Biology**, [s.l.], v. 311, p. e231-264, 18 jun 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800179-0.00005-2>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/bookseries/abs/pii/B9780128001790000052>. Acesso em: 14 jul 2024.
- BRITO, S. A. *et al.* Utilização do lodo da ETA de Xique-Xique, BA: produção de mudas de *Cnidoscolus quercifolius* originária da Caatinga. **Revista Sertão Sustentável**, [s.l.], v.3, n.1, 2021. Acesso em: 23 abr 2023.
- COLINO, Marcelo. Marchi de. **Uso de lodo de estações de tratamento de água e esgoto urbano como condicionador de solo, com ênfase nas propriedades físicas do solo**. 2006. 133 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômica da Unesp, Botucatu, SP, 2006. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/356680ae-1948-4b48-ba45-8a5ca687814b>. Acesso em: 13 out 2025.
- CUNHA, G. D. *et al.* Water treatment station body as a component for forestry management. **Ibero-American Journal of Environmental Sciences**, [s.l.] v. 11, n.1. p. e40-53, jan 2020. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.001.0005>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2020.001.0005>. Acesso em: 05 abr. 2023.
- DIXIT, A.; BURNEY, O. Nursery cultural practices influence morphological and physiological aspen seedling traits: implications for post-fire restoration. **Canadian Journal of Forest Research**, [s.l.], v. 54, 5 sep 2024. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2024-0031>. Disponível em: <https://cdnsciencepub.com/doi/full/10.1139/cjfr-2024-0031>. Acesso em: 02 jun 2025.
- FIGUEIREDO NETO, A. **Use of sludge treatment plant water in the production of tree seedlings to occurrence in the savanna**. 2011. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/items/f4a959d1-552a-4b54-8937-14ed3a9026c6/full>. Acesso em: 23 mar 2023.
- FONSECA, E. P. *et al.* Padrão de qualidade de mudas de *Trema micrantha* (L.) Blume, produzidas sob diferentes períodos de sombreamento. **Sociedade de Investigações**

Florestais, [s.l.], v. 26, n.4, p. e515-523, 20 jun 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622002000400015>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rarv/a/BNYqFjJTqcyx3cpjPfXPQgL/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 14 ago 2024.

GOMES, J. M. Parâmetros morfológicos na avaliação da qualidade de mudas de Eucalyptus grandis, produzidas em diferentes tamanhos de tubetes e de dosagens de N-P-K. 2001, 126 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001. Disponível em: <https://locus.ufv.br/items/06d7cca4-0998-4595-ba9e-4efc03910231>. Acesso em: 02 jun 2025

HUSSEIN, A. *et al.* Impacts alum DWTPs sludge discharge and changes in flow regime of the Nile River on the quality of surface water and cultivated soils in Fayoum watershed, Egypt. **Science of the Total Environment**, Beni-Suef, v. 766, 25 dez 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144333>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720378645>. Acesso em: 14 ago 2024.

MARTINS, D. S. *et al.* Sludge from a water treatment plant as an adsorbent of endocrines disruptors. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s.l.], v. 10, n. 4. 12 jun 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108090>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343722009630>. Acesso em: 17 mar 2024.

MARQUES, M. C. M. *et al.* Germinação de *Cedrela fissilis VELL.* e *Parapiptadenia rígida (BENTH)BREN.* após pré-tratamento em condições hipóxicas e posterior estocagem a seco. **Anais – 2º Congresso Nacional sobre Essências Nativas.** v. 4, n.2, 1992. DOI: <https://doi.org/10.24278/2178-5031.199242844>. Disponível em: <https://rif.emnuvens.com.br/revista/article/view/844>. Acesso em: 02 dez 2024.

MASSAD, M. D. *et al.* Alternative substrates in the production of seedlings of flamboyant and ipe-mirim. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 10, n. 2, p. e251-256, abr-jun, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v10i2.3475>. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7304202>. Acesso em: 28 nov 2023

ROCHA, D. N. *et al.* Utilização do lodo da estação de tratamento de água na produção de mudas de eucalipto. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v.7, n.3, p.e11-20, 2015. DOI: <https://doi.org/10.18406/2316-1817v7n32015617>. Disponível em: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/617>. Acesso em: 01 nov 2024.

SANTOS, J. R. S. *et al.* Impactos gerados pelo lodo oriundo da estação de tratamento de água (ETA) do município de Pau Brasil (Bahia). **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, [s.l.], v. 12, n. 2, 2024. DOI: <https://doi.org/10.9771/gesta.v0i2.51872>. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/51872>. Acesso em: 06 jun 2025.

SHAH, S. A. R. *et al.* Compaction performance analysis of alum sludge waste modified soil. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 230, n. 10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116953>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819323955>. Acesso em: 02 dez 2024.

SHENG, D. P. W. *et al.* Assessment and Optimization of Coagulation Process in Water Treatment Plant: A Review. **ASEAN Journal of Science and Engineering**, [s.l.], v. 3 n. 1, p. e79-100, 1 mar 2023. DOI: [10.17509/ajse.v3i1.45035](https://doi.org/10.17509/ajse.v3i1.45035). Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/reader/dfe688ca85a5516b326926af8e336d6aa08eb7b>. Acesso em: 15 nov 2024.

SILVA, L. C. S. *et al.* Concessions for basic sanitation services in Southern Brazil: A generalized synthetic control analysis. **Utilities Policy**, [s.l.], v. 87, 23 feb 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2024.101727>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957178724000201>. Acesso em: 2 jul 2025.

URBAN, R. C. *et al.* A system dynamics approach for large-scale water treatment plant sludge management: A case study in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 419, 14 jul 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138105>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623022631>. Acesso em: 14 jul 2024.

SESSÃO 3: LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E CRESCIMENTO DE *Tecoma stans* (L.) JUSS. ex KUNTH SOBRE SOLO COM ADIÇÃO DE COBRE

RESUMO

O avanço da industrialização, o aumento populacional e da geração de resíduos sólidos resulta em crescimento de ocorrências de contaminações nos solos. As poluições por metais pesados são problemáticas para o funcionamento de ecossistemas e para a saúde humana, em consequência dos seus efeitos no funcionamento celular, e pela capacidade de bioacumulação e biomagnificação na teia trófica. As contaminações por cobre são preocupantes pelo número de ocorrências e impactos ambientais. Este metal é um micronutriente, necessário em pequenas quantidades, e o aumento de suas concentrações no solo tem origem em atividades antrópicas. Com o objetivo de reduzir os impactos e riscos, o uso de plantas para descontaminação é uma alternativa de baixo custo e ambientalmente correta. Embora o uso da *Tecoma stans*, como fitorremediador ainda seja pouco explorado, esta espécie vegetal apresenta fácil adaptabilidade a solos degradados, boa dispersão e crescimento rápido. Além disso, o lodo de estações de tratamento de água apresenta capacidade de adsorver metais pesados. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o poder de biorremediação da associação entre lodo de ETA e *Tecoma stans*. Foram preparados 6 tratamentos sendo: M1: solo + *Tecoma stans*; M2: 75% solo 25% LETA + *Tecoma stans*; M3: solo contaminado com sulfato de cobre II + *Tecoma stans*; M4: 75% solo contaminado com sulfato de cobre II + 25% lodo + *Tecoma stans*; M5 – solo contaminado com sulfato de cobre II; M6: 75% solo contaminado com sulfato de cobre II + 25% lodo. O solo foi coletado em área de Latossolo Vermelho Ácrico típico, de textura argilosa. As plântulas germinadas em substrato comercial foram transplantadas para vasos contendo os diferentes tratamentos, onde permaneceram em desenvolvimento por 75 dias. A adição de sal de cobre não elevou a concentração a níveis de intervenção Os tratamentos sem adição de lodo (M1 e M3) mostraram maior absorção de cobre pelas plantas com fatores de bioconcentração 13,94 e 19,28, respectivamente, indicando que o LETA pode interferir na capacidade de absorção de cobre em condição de ausência de contaminação. Por outro lado, os tratamentos com lodo (M2, M4 e M6) apresentaram maiores concentrações de cobre no solo, indicando que o resíduo contribui na maior disponibilização e menor absorção de cobre pelas plantas.

Palavras-chave: Ipê amarelo mirim; Metal pesado; biorremediação; resíduos.

ABSTRACT

The advancement of industrialization, population growth, and the increasing generation of solid waste have resulted in a rise in soil contamination events. Heavy metal pollution is problematic for ecosystem functioning and human health due to its effects on cellular processes and its capacity for bioaccumulation and biomagnification within food webs. Copper contamination is of particular concern because of its frequency and associated environmental impacts. Although this metal is an essential micronutrient required in small quantities, elevated concentrations in soils originate primarily from anthropogenic activities. In order to reduce environmental impacts and risks, the use of plants for decontamination represents a low-cost and environmentally sound alternative. The application of *Tecoma stans* as a phytoremediator remains relatively unexplored; however, this species exhibits high adaptability to degraded soils, effective dispersal, and rapid growth. In addition, sludge from water treatment plants has the ability to adsorb heavy metals. Therefore, the objective of this study was to evaluate the bioremediation potential of the association between water treatment plant sludge and *Tecoma stans*. Six treatments were established as follows: M1, soil + *Tecoma stans*; M2, 75% soil + 25% WTPS + *Tecoma stans*; M3, soil contaminated with copper (II) sulfate + *Tecoma stans*; M4, 75% soil contaminated with copper(II) sulfate + 25% sludge + *Tecoma stans*; M5, soil contaminated with copper(II) sulfate; and M6, 75% soil contaminated with copper(II) sulfate + 25% sludge. The soil was collected from an area classified as a typical Acric Red Latosol with clayey texture. Seedlings germinated in a commercial substrate were transplanted into pots containing the respective treatments and cultivated for 75 days. Overall, *Tecoma stans* demonstrated satisfactory performance in the phytoremediation process. Treatments without sludge addition (M1 and M3) showed greater copper uptake by the plants, with bioconcentration factors of 13.94 and 19.28, respectively, indicating that WTPS may negatively interfere with phytoremediation. Conversely, treatments containing sludge (M2, M4, and M6) exhibited higher copper concentrations in the soil, indicating that the residue contributes to increased copper retention and reduced plant uptake.

Key words: Yellow Trumpetbush; heavy metal; bioremediation; waste

1 INTRODUÇÃO

A contaminação dos solos por metais pesados, provenientes do crescimento da industrialização, tem sido uma preocupação crescente em todo o planeta (Bhat *et al.*, 2022). Tais poluentes, em geral, apresentam características de persistência no ambiente, bioacumulação (passado via cadeia trófica), além de meia-vida superior a 20 anos (Kapoor; Singh, 2021).

O cobre (Cu) é um metal pesado básico, comumente encontrado em rochas; em pequenas quantidades é considerado um micronutriente, porém, quando a concentração no solo supera 200 mg de cobre por kg, em decorrência de atividades antrópicas (mineração, metalurgia, galvanoplastia, fungicidas, lançamento de esgoto não tratado), este elemento se torna tóxico a microrganismos, plantas e animais, sendo necessária uma intervenção com remediação (Bhat *et al.*, 2022; Mendonça *et al.*, 2021; Marco *et al.*, 2021).

Muitas técnicas de remediação do solo contaminado com metais pesados têm sido utilizadas a fim de minimizar este impacto (Shen *et al.*, 2021). No entanto, muitas delas são acompanhadas de altos custos financeiros e de prejuízos em relação à microbiota e à estrutura do solo. Dessa forma, a fitorremediação surge como uma alternativa ambientalmente mais adequada e com menores custos (Shen *et al.*, 2021).

Diversas plantas já foram catalogadas como aptas a promover a biorremediação; entretanto, descobertas de novas espécies, com potencial para a fitorremediação, são comumente experimentadas em pesquisas científicas mundo afora (Shen *et al.*, 2021).

A *Tecoma stans* (L.) JUSS. ex KUNTH, conhecida popularmente como Ipê-de-jardim, é uma planta arbustiva de fácil crescimento e germinação, suas sementes “aladas” não apresentam dormência, ou seja, podem germinar em qualquer época do ano e têm fácil dispersão (Singh *et al.*, 2024). O Ipê-de-jardim é comumente utilizado como planta medicinal (Anand; Basavaraju, 2021), porém, devido às características já mencionadas, somadas à fácil adaptabilidade à solos mais degradados, é uma planta com potencial de fitorremediação.

Alinhado à fitorremediação, o lodo de ETA surge como um potencial agente no tratamento de solos contaminados por metais pesados. Devido a suas características de porosidade, presença de matéria orgânica e capacidade de troca catiônica o LETA pode ser considerado um promissor adsorvente de poluentes como metais pesados (Carmo *et al.*, 2022).

Atualmente, já se sabe da capacidade do LETA de ser usado para a remoção de metais pesados em efluentes (Abba *et al.*, 2022). Estudos recentes, que avaliaram o potencial do lodo para remoção de metais pesados como o cobre (Cu), indicaram resultados promissores em que a remoção do Cu de uma solução, com efluente tratado, foi completa (Almeida *et al.*, 2024). Outra pesquisa apresentou remoção de 93,6% do Cu em pH 6, indicando uma excelente capacidade adsorvente do lodo (Abba *et al.*, 2022).

Existe uma gama de estudos do potencial do LETA na imobilização e na remoção de metais pesados em efluentes tratados e sintéticos. Entretanto, pouco se encontra na literatura sobre o uso do lodo associado à fitorremediação na descontaminação de solos afetados por metais pesados, mais especificamente, em relação ao cobre. Dessa forma, este estudo pretende avaliar o potencial de fitorremediação do lodo da ETA Capim Branco associado a mudas de *Tecoma stans* (L.) JUSS. ex KUNTH. Assim, espera-se que o lodo potencialize a descontaminação do solo a partir da absorção e translocação do cobre para as folhas do ipê-de-jardim.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Um ensaio foi montado para o crescimento de mudas de ipê-de-jardim sobre um solo com montagens diferentes, sendo solo, solo com LETA, solo com cobre, solo com LETA e cobre, para avaliação do potencial de fitorremediação de cobre pelo ipê-de-jardim quando associado ao lodo da estação de tratamento de água Capim Branco. Para isso, foram preparados diferentes tratamentos e foi feita a análise da concentração de cobre no solo e nas folhas das plantas.

2.1 Coleta do solo

O solo foi coletado no dia 31 de julho de 2024 em uma área localizada próxima a Universidade Federal de Uberlândia no Campus Glória (Figura 29), cujas coordenadas são: 48°13'4,0758" O; 18°56'41,8776" S. O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho Ácrico típico, de textura muito argilosa. Para a coleta, foram utilizados instrumentos de construção civil, pá e peneira de malha 2 mm. O solo foi peneirado e acondicionado em sacos de rafia (Figura 30). Após a coleta, 500 g do solo foram separadas e acondicionadas em um saquinho *ziplock* e direcionado para as análises físico-químicas, o restante foi transportado para o Laboratório de Microbiologia da Universidade Federal de Uberlândia.

Figura 29 – Ponto de coleta de solo no Campus Glória da Universidade Federal de Uberlândia



Fonte: Google Earth, 2024.

Figura 30 – Coleta do solo e acondicionamento em sacos de rafia visando a montagem do ensaio de fitorremediação de cobre a partir da associação de ipê-de-jardim e LETA



Fonte: O autor, 2024.

2.2 Caracterização e preparo do solo e do lodo coletado

O solo coletado no dia 31 de julho de 2024 foi encaminhado para análise em laboratório, onde foi classificado como Latossolo vermelho argiloso e suas propriedades foram identificadas (Tabela 16).

Tabela 16 – Análise e caracterização do solo coletado

Análise	Resultado em umidade natural	Extrator ou referência
pH	5,0	-
Carbono Orgânico (dag/kg)	0,43	Método Colorimétrico
Potássio (mg/dm ³)	12,8	Mehlich-1
Cálcio (cmolc/dm ³)	0,56	KCl 1,0 mol/L
Magnésio (cmolc/dm ³)	0,17	KCl 1,0 mol/L
Enxofre (mg/dm ³)	0,91	-
Boro (mg/dm ³)	0,41	-
Cobre (mg/dm ³)	2,07	Mehlich-1
Ferro (mg/dm ³)	15,78	Mehlich-1
Manganês (mg/dm ³)	3,15	Mehlich-1
Zinco (mg/dm ³)	1,18	Mehlich-1
Alumínio (cmol/dm ³)	0,04	KCl 1,0 mol/L
CTC (cmol/dm ³)	1,96	-
Acidez Potencial (H+Al) (cmol/dm ³)	1,20	-
Saturação de Bases (%)	38,90	-
Textura		
Areia grossa (g/kg)	114	
Areia fina (g/kg)	92	
Silte (g/kg)	127	Densímetro
Argila (g/kg)	667	

Fonte: O autor, 2024.

Para correção, foi determinada elevação de saturação da CTC por bases para 60%, com 45% da saturação por Ca e 15% com Mg. Portanto, foi aplicado carbonato de cálcio e magnésio. Após correção do pH, foi adicionado fosfato (KH_2PO_4) e ureia (Tabela 19).

O lodo, por sua vez, foi coletado entre agosto de 2023 e janeiro de 2024. Foram realizadas 5 coletas com 5 kg de lodo em cada, ou seja, 5 sacos plásticos. Após as coletas o lodo ficou fechado e mantido em temperatura ambiente no Laboratório de Microbiologia (LAMIC) da Universidade Federal de Uberlândia. Com isso, foi realizada a análise laboratorial do LETA (Tabela 17). Posteriormente, o LETA foi homogeneizado, bem espalhado sobre uma lona e

deixado ao tempo por 10 dias para sua desidratação em tempo aberto com incidência de luz solar, sem precipitação de chuva (Figura 31).

Este método visou maior eficiência na homogeneização dos materiais e também a diminuição do excesso de umidade. Após a secagem, o lodo foi guardado em sacos de *ziplock* e mantido a temperatura ambiente até a formação dos ensaios.

Tabela 17 – Análise e caracterização do lodo da ETA Capim Branco

Análise	Resultado em umidade natural	Extrator ou referência
pH	7,3	-
Densidade (g cm ⁻³)	0,78	-
Nitrogênio Total (%)	1,5	-
Carbono Orgânico (%)	5,22	Espectrofotometria
Matéria Orgânica (%)	9,0	Espectrofotometria
Relação C/N	17/1	-
Fósforo (mg.dm ⁻³)	17,96	Mehlich-1
Potássio (cmol _c dm ⁻³)	0,13	Mehlich-1
Cálcio (cmol _c dm ⁻³)	2,20	KCL 1mol L ⁻¹
Magnésio (cmol _c dm ⁻³)	0,50	KCL 1mol L ⁻¹
Enxofre (mg.dm ⁻³)	7,0	Fosfato Monobásico de Cálcio
Boro (mg .dm ⁻³)	0,52	Água quente
Cobre (mg dm ⁻³)	1,90	DTPA
Ferro (mg dm ⁻³)	6,0	DTPA
Manganês (mg dm ⁻³)	5,0	DTPA
Zinco (mg dm ⁻³)	0,70	DTPA
H+Al (cmol _c)	3,83	SMP a pH 7,5
CTC (cmol _c)	2,83	-
Textura		
Areia (g.kg ⁻¹)	850	
Silte (g.kg ⁻¹)	50	Densímetro
Argila (g.kg ⁻¹)	100	

Fonte: o autor, 2023.

Figura 31 – Lodo em processo de secagem durante 10 dias ao ar livre



Fonte: O autor, 2024.

2.3 Preparo das amostras

2.3.1 Germinação das sementes

As sementes utilizadas foram doadas pelo Horto Municipal de Uberlândia e não tiveram procedência conhecida. O lote doado foi feito por coleta aleatória realizada em toda a cidade, sem seleção de plantas matrizes para identificação de sua procedência. O critério para a seleção da espécie foi ser uma planta de fácil germinação, desenvolvimento em ambientes pobres em nutrientes e crescimento durante todo o ano.

A germinação das sementes de ipê-de-jardim foi feita em bandejas de plástico em formato de tronco de pirâmide. As sementes foram deixadas em papel toalha úmido durante 24 horas para a quebra de dormência, posteriormente foram semeadas, em substrato comercial específico para mudas, 3 bandejas com 64 células cada (Figura 32), totalizando 192 sementes. Após a introdução da semente, os orifícios foram fechados.

Figura 32 – Semeadura de *Tecoma stans* em bandeja de germinação para serem transplantadas para os tratamentos após 30 dias.



Fonte: O autor, 2025.

A germinação das plantas ocorreu a partir do 12º dia da semeadura em bandeja. Após o 30º dia, foi utilizado o critério de tamanho para o transplantio. As 20 maiores plântulas, medidas com régua de precisão 0,1 cm, foram retiradas com cuidado mantendo todo o substrato das raízes e foram transplantadas para os recipientes de plástico com capacidade de 400 ml.

2.3.2 Preparo do ensaio e transplantio

Após a germinação, as plântulas foram transplantadas para o recipiente de plástico devidamente preparado. Considerando os bons resultados de crescimento da etapa anterior, foi definido a concentração de 25% de lodo para a realização do ensaio.

Dessa forma, o passo seguinte foi a preparação do substrato. Foram preparados 6 tratamentos com 5 repetições cada, totalizando 30 amostras. Nesta etapa de estudo, foi analisado o potencial de imobilização do lodo em relação aos metais pesados, neste caso, o cobre, bem como o potencial de fitorremediação da *Tecoma stans* associada ou não ao lodo. Para isso os tratamentos M3, M4, M5 e M6 foram contaminados com Sulfato de Cobre II ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Os tratamentos foram divididos da seguinte forma:

- Tratamento 1 (M1): 100% solo + Ipê-de-jardim.
- Tratamento 2 (M2): 75% solo + 25% lodo + Ipê-de-jardim.
- Tratamento 3 (M3): 100% solo + Ipê-de-jardim + sulfato de cobre II penta hidratado.

- Tratamento 4 (M4): 75% solo + 25% lodo + Ipê-de-jardim + sulfato de cobre II penta hidratado.
- Tratamento 5 (M5): 100% solo + sulfato de cobre II penta hidratado.
- Tratamento 6 (M6): 75% solo + 25% lodo + sulfato de cobre II penta hidratado.

Após o preparo do solo, germinação das sementes e a preparação do lodo (secagem e peneiramento em peneira de 2 mm), o ensaio foi montado. Este ensaio contou com 6 tratamentos e 5 repetições. Inicialmente, foi feita a correção do pH do solo em todos os tratamentos e a adição do metal pesado nos tratamentos específicos (Tabela 18). A quantidade de sulfato de cobre (II) foi definida a partir do limite máximo de investigação para uso agrícola do solo, segundo determinado pela Resolução CONAMA 420, de 28 de dezembro de 2009, que dispõe sobre a qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas (CONAMA, 2009).

Tabela 18 – Materiais e produtos químicos utilizados na montagem do ensaio para cada tratamento

Trat.	Solo	Lodo	Ipê	Correção do pH				Ureia	
				CuSO ₄	mg/vaso			5 dias	30 dias
					MgCO ₃	CaCO ₃	KH ₂ PO ₄		
ml/vaso								ml/vaso	
M1	400	0	Sim	0	20,8	64,4	527	4	4
M2	300	100	Sim	0	15,6	48,3	395	4	4
M3	400	0	Sim	314	20,8	64,4	527	4	4
M4	300	100	Sim	314	15,6	48,3	395	4	4
M5	400	0	Não	314	20,8	64,4	527	4	4
M6	300	100	Não	314	15,6	48,3	395	4	4

M1: solo e ipê-de-jardim; M2: solo, lodo e ipê-de-jardim; M3: solo, ipê-de-jardim e cobre; M4: solo, lodo, ipê-de-jardim e cobre; M5: solo e cobre; M6: solo, lodo e cobre. Volume total de solo ou solo + lodo de cada vaso: 400 mL. CuSO₄.5H₂O adicionado como fonte de cobre Adição de MgCO₃ e CaCO₃ para correção do pH do solo. Adição de KH₂PO₄ e ureia para a aumentar a fertilização do solo.

Fonte: O autor, 2025.

A adição dos produtos foi realizada em bandeja (Figura 33), com homogeneização para cada tratamento. Bandejas diferentes foram utilizadas para cada tratamento para evitar contaminação.

Figura 33 – Disposição do solo, lodo e produtos químicos antes da homogeneização para formação do tratamento 4



Fonte: O autor, 2025.

Após a homogeneização, o produto foi distribuído em recipientes de plástico de 400 ml e adicionado cerca de 100 ml de água natural em temperatura ambiente. Após a irrigação, foi feita uma cova para o transplantio dos brotos de *Tecoma stans* (Figura 34).

Figura 34 – Cova para o transplantio dos brotos de *Tecoma stans*.



Fonte: O autor, 2025.

Todas as etapas foram repetidas em recipientes diferentes para todos os tratamentos. Após o transplantio, as mudas foram encaminhadas para o viveiro do Departamento Municipal de Água e Esgoto de Uberlândia (Figura 35) onde cresceram por 75 dias. As unidades amostrais foram distribuídas, conforme delineamento experimental de blocos casualizados (DBC), de modo que cada bloco apresentasse uma unidade amostral de cada tratamento, distribuídos de forma aleatória (Tabela 19), evitando, assim, favorecimento ou desfavorecimento de algum tratamento.

Figura 35 – Tratamentos distribuídos no viveiro do Departamento Municipal de Água e Esgoto de Uberlândia



Fonte: O autor, 2025.

Tabela 19 – Distribuição das unidades amostrais em DBC.

BLOCO 1		BLOCO 2		BLOCO 3		BLOCO 4		BLOCO 5	
M2E	M5B	M6A	M4C	M2C	M6D	M4E	M1B	M2A	M6B
M6C	M1C	M2D	M1D	M4B	M1E	M2B	M3A	M1A	M5E
M3E	M4D	M5C	M3C	M5D	M3D	M6E	M5A	M3B	M4A

Fonte: O autor, 2025.

Aos 5 e aos 30 dias do transplantio, aplicou-se 4 ml por vaso de uma solução de ureia de 40 g/L diluída em água destilada (Figura 36). A ureia tem a função de fornecer nitrogênio (N) de forma rápida e disponível para as plantas e, assim, melhorar a fertilidade do solo.

Figura 36 – Adição de ureia sobre solo úmido nas parcelas com crescimento de ipê-de-jardim



Fonte: O autor, 2025.

Após os 75 dias de transplantio, as unidades amostrais foram recolhidas e levadas para o Laboratório de Microbiologia Ambiental (LAMIC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) para a separação entre planta e solo. Após a separação, cada unidade de planta e o solo de cada unidade experimental foram acondicionados em uma embalagem *ziplock* e identificados. Posteriormente, as amostras foram encaminhadas para análise em laboratório.

As amostras de solo foram analisadas para determinação dos parâmetros químicos. O pH foi medido por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão solo: líquido (CaCl_2) na proporção 1:2,5 (Teixeira *et al.*, 2017). Fósforo (P) e potássio (K^+) foram medidos por espectrofotometria após extração por Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ e H_2SO_4 0,0125 mol L⁻¹) conforme Teixeira *et al.* (2017). Os metais Manganês (Mn), Zinco (Zn), Ferro (Fe) e Cobre (Cu) foram estimados por meio de ICP-OES a partir da extração em solução de DTPA (Teixeira *et al.*, 2017). Calcio (Ca^{2+}) e Magnésio (Mg^{2+}) foram extraídos em KCl 1 M e estimados por espectrofotometria de absorção atômica conforme Teixeira *et al.* (2017). A acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$) foi determinada em solução SMP a pH 7,5 (Raji; Quaggio; 1983). A soma de bases (SB) foi determinada a partir da soma dos valores obtidos dos cátions básicos no solo (Ca, Mn, K e Na). Já a capacidade de troca catiônica (t) foi calculada a partir da soma dos valores obtidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e $\text{H} + \text{Al}$. A concentração de cobre nas amostras de plantas foi extraída em mistura nitroperclórica e determinada por meio de ICP-OES (Silva, 2009).

2.4 Fator de Bioconcentração (FBC)

Para avaliar o potencial de fitorremediação da *Tecoma stans* foi utilizado o Fator de Bioconcentração (FBC), que indica o grau de afinidade de um poluente a um organismo vivo por meio da razão da concentração da espécie química na planta pela concentração no substrato de crescimento. Nesse fator, quanto maior o seu valor, maior o potencial de fitorremediação da planta. Para o cálculo do FBC foi utilizada a equação 5.

$$FBC = \frac{\text{Metal}_{\text{planta}}}{\text{Metal}_{\text{solo}}} \quad (\text{equação 5})$$

Em que:

$\text{Metal}_{\text{planta}}$: é a concentração de metal na planta

$\text{Metal}_{\text{solo}}$: é a concentração de metal no solo

2.5 Análise estatística

Os dados foram submetidos aos pressupostos da análise de variância sendo conferido a normalidade dos resíduos, homoscedasticidade de variâncias, aditividade do modelo e independência dos resíduos, as variáveis que atendem a estes pressupostos (pH, P, K, Zn, Fe, Cu no solo, Cu na Planta, FBC, Mg, Ca, H + Al, SB) foram submetidas a análise de variância ANOVA e suas médias foram comparadas através do teste de Scott-Knott. Já as variáveis que não atenderam aos pressupostos (Mn, CTC) foram submetidas ao teste não paramétrico de Friedman. Para as análises estatísticas utilizou-se o software R.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização química do solo e efeito dos tratamentos

A adição do lodo de ETA (tratamentos M2 e M4) resultou em um pH mais alto em relação aos tratamentos sem lodo (M1, M3, M5) (Tabela 20), indicando o potencial alcalinizante do lodo. Os tratamentos M2 (ipê-de-jardim e aplicação de LETA) e M4 (ipê-de-jardim, aplicação de LETA e cobre) apresentam pH estatisticamente iguais, mas mais altos (menos ácidos) se comparados aos tratamentos sem adição de lodo. Essa elevação do pH reflete o caráter alcalino e corretivo do lodo, fato que é corroborado por Arab et al. (2020), os quais concluíram que a aplicação de resíduos de ETA em solos ácidos aumenta o pH a valores similares ou até superiores, em alguns casos, à calagem.

Tabela 20 – Variáveis químicas do solo e concentração de cobre na massa foliar dos tratamentos com adição de cobre e de lodo de estação de tratamento de água sob crescimento de ipê-de-jardim

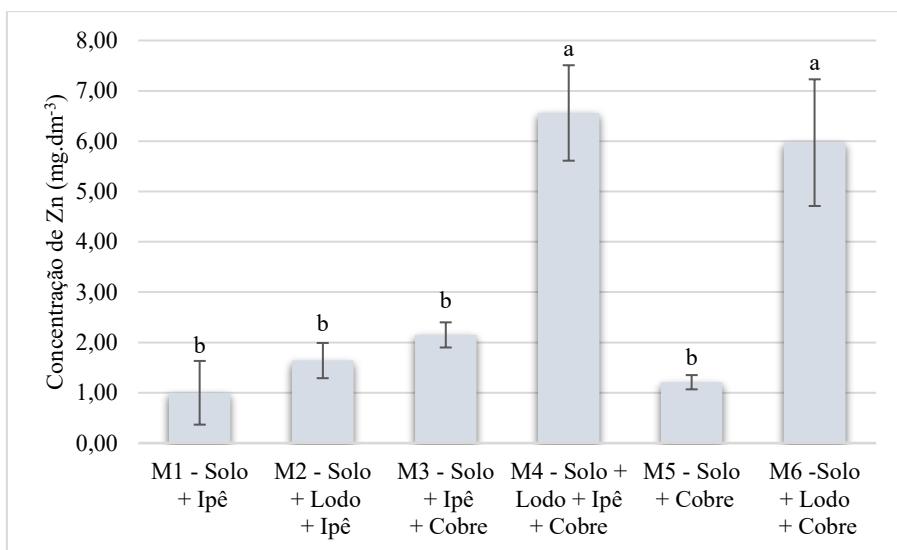
Tratamento	pH	P	K	Mn	Zn	Fe	Cu no solo	Cu na planta	FBC	Mg	Ca	H+Al	SB	t
		mg/dm ³							-	cmolc				
M1 - Solo + ipê	5,17 c	27,85 a	74,34 a	2,08 e	1,00 b	10,86 c	0,39 c	5,14 b	13,94 a	0,27 c	0,94 d	4,93 a	1,37 c	1,46 c
M2 - Solo + ipê + Lodo	5,62 a	32,94 a	56,10 b	6,52 d	1,64 b	9,88 c	0,94 b	3,62 b	3,79 b	0,39 a	1,54 a	3,38 c	2,06 a	2,06 b
M3 - Solo + ipê + Cu	5,42 b	28,24 a	82,77 a	31,12 a	2,15 b	69,84 b	0,45 c	8,76 a	19,28 a	0,32 b	1,09 c	4,40 b	1,63 b	2,57 a
M4 - Solo + ipê + Lodo + Cu	5,66 a	30,34 a	35,59 b	10,27 b	6,56 a	72,63 b	1,22 a	8,22 a	6,78 b	0,37 a	1,46 a	3,30 c	1,93 a	1,93 b
M5 - Solo + Cu	5,20 c	23,27 a	52,17 b	9,28 c	1,21 b	83,21 a	0,31 c	-	-	0,23 c	0,84 d	5,20 a	1,20 c	1,29 d
M6 - Solo + Lodo + Cu	5,49 b	32,34 a	42,45 b	8,58 c	5,97 a	89,30 a	1,17 a	-	-	0,35 b	1,32 b	3,84 c	1,77 b	1,77 c

Média dos tratamentos (n = 5). Letras minúsculas diferentes nas colunas indicam diferença estatística ($p < 0,05$, teste Scott-Knott). pH, potencial hidrogenionico; P, fosforo; K, potássio; Mn, magnésio; Zn, zinco; Fe, ferro; Cu no solo, cobre no solo; Cu na planta, cobre nas folhas das plantas; FBC, fator de bioconcentração (Cu na planta / Cu no solo); Mg, magnésio; Ca, cálcio; H+Al, acidez potencial; SB, soma de bases; t, capacidade de troca de cátions efetiva. Dose de contaminação - Cu: 200 mg/dm³.

Fonte: o autor, 2025.

Os tratamentos M4 e M6, onde houve aplicação de LETA em solos com adição de cobre, apresentaram maiores concentrações de zinco (Zn) quando comparados aos demais tratamentos (Figura 37). Isso pode ter acontecido uma vez que o cobre tem afinidade por alguns sítios de adsorção (argilas, matéria orgânica) e, quando foi adicionado, pôde competir por esses sítios, tanto os que estavam presentes no solo quanto no lodo, e ter deslocado o zinco, antes adsorvido, para a solução do solo aumentando a fração solúvel deste metal (Jalali *et al.*, 2023). Esse processo pode, ainda, ser potencializado com o aumento do pH causado pela adição do lodo (Jalali *et al.*, 2023).

Figura 37 – Concentrações de zinco em cada tratamento evidenciando a maior concentração em tratamentos com a presença de LETA e cobre (M4 e M6)



As barras estreitas representam o intervalo de desvio padrão. As letras minúsculas diferentes em cima das barras indicam diferenças estatísticas pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$)

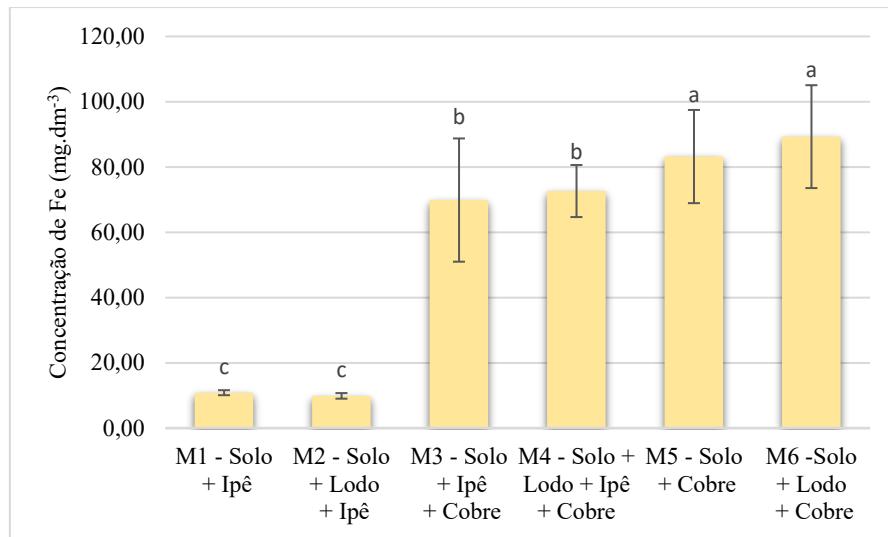
Fonte: o autor, 2025.

A adição de sulfato de cobre II (M3, M4, M5 e M6) aumentou a disponibilidade de Fe no solo (Figura 38). A aplicação do sulfato de cobre pode ter alterado a dinâmica da comunidade microbiana no solo influenciando no potencial redox, reduzindo óxidos de Fe em Fe^{2+} (ferro solúvel); adicionalmente, o cobre pode inibir a ação de microrganismos que precipitam/imobilizam o Fe, aumentando sua disponibilidade no solo (Chaudhary, *et al.*, 2023).

Ademais, o sulfato presente no cobre, adicionado ao solo, pode favorecer a liberação de Fe em curtos espaços de tempo a partir da formação temporária de complexos Fe-sulfato promovendo a liberação do ferro, antes, adsorvido (Wang, *et al.*, 2023). Por fim, outra explicação pode ser a competição por sítios de adsorção do Cu^{2+} com o Fe, uma vez que este

primeiro é um cátion fortemente absorvível e compete por sítios em óxidos de Fe. Esta adsorção desloca o Fe que estava adsorvido, transferindo o metal para a fase de solução aumentando o Fe disponível (Liang, *et al.*, 2022).

Figura 38 – Concentrações de ferro no solo em tratamentos com crescimento de ipê, adição de cobre (200 mg por dm³ de solo) e lodo de estação de tratamento de água



As barras estreitas representam o intervalo de desvio padrão. As letras minúsculas diferentes em cima das barras indicam diferenças estatísticas pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$)

Fonte: O autor, 2025.

Já em relação ao cálcio e magnésio, ambos apresentaram valores maiores e estatisticamente iguais nos tratamentos com a presença de lodo. O cálcio e o magnésio são nutrientes importantes para a fertilidade do solo, atuando na estrutura e funcionamento das membranas das paredes celulares das plantas e o magnésio atua como ativador enzimático e participa na estruturação da clorofila (Lange, *et al.*, 2021). Tal fato indica que o lodo de ETA pode auxiliar no incremento destes nutrientes.

Em relação ao fósforo (P), potássio (K) e manganês (Mn) não houve diferença estatisticamente significativa associada ao lodo ou cobre

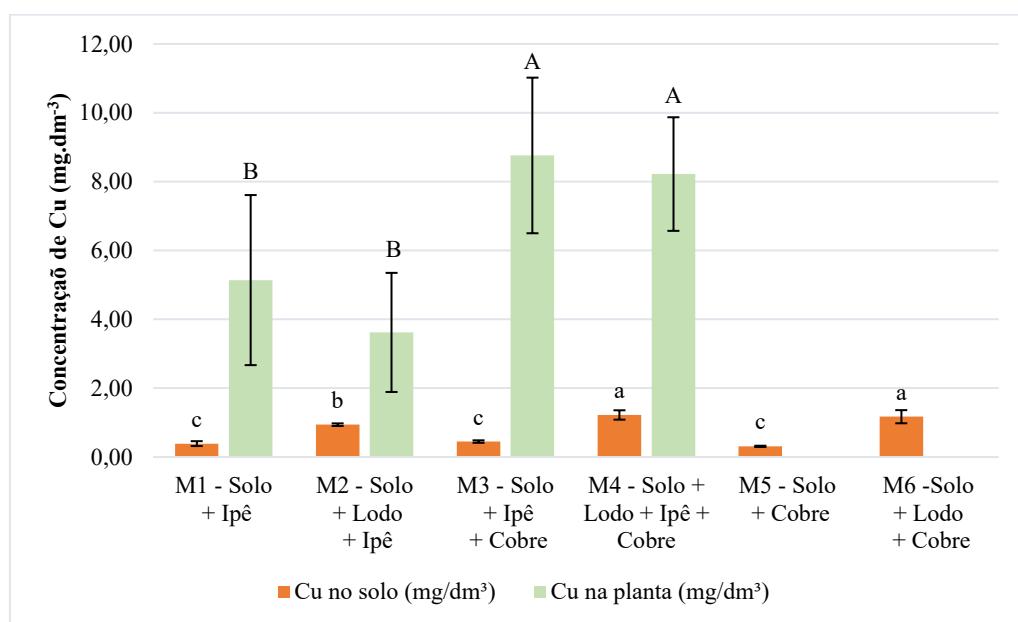
3.2 Concentração de cobre no solo e nas folhas de *Tecoma stans*

Nos tratamentos contaminados com cobre (M3, Solo + Ipê-de-jardim + Cobre; M4, Solo + Lodo + Ipê-de-jardim + Cobre; M5, Solo + Cobre; M6, Solo + Lodo + Cobre) a concentração média de Cu no solo e nas plantas (M3 e M4) não atingiu os valores de prevenção e intervenção dispostos na Resolução CONAMA 420/2009. Os valores absolutos no solo permaneceram

relativamente baixos ($< 2 \text{ mg/dm}^3$), o que indica que grande parte do metal pode ter sido lixiviado, principalmente nos tratamentos sem a presença do lodo, outra hipótese dessa redução é devido a capacidade tampão do latossolo. Latossolos, devido aos óxidos e minerais de carga variável, tem alta capacidade de absorver íons, incluindo o cobre, afetando na disponibilidade desse metal (Lima *et al.*, 2023). Estudos sobre lixiviação de cobre apresentam dados que corroboram com a translocação do metal na forma de complexos solúveis com matéria orgânica dissolvida, sendo um fator de risco para contaminação de lençóis freáticos (Filipovic *et al.*, 2023).

Os tratamentos M4 (Solo + Lodo + Ipê-de-jardim + Cobre) e M6 (Solo + Lodo + Cobre), apresentaram as maiores médias de concentração de cobre no solo e são estatisticamente iguais, seguidos por M3 (solo, ipê-de-jardim, LETA) (Figura 39). Os tratamentos M4 e M6 são compostos por lodo, o que indica que o resíduo apresenta potencial de mobilização e de disponibilização do cobre quando acessível nos solos. Apesar disso, outros estudos mostraram efeitos contrários, como, por exemplo, uma eficiência de 93% de remoção de cobre em efluente tratado a partir do uso do LETA (Almeida *et al.*, 2024). O uso de LETA no solo também reduziu significativamente a concentração de cobre na água servindo como barreira física e ativando mecanismo de imobilização (Wei, *et al.*, 2024). Entretanto, essas investigações ocorreram em solos com maior concentração de cobre.

Figura 39 – Análise das concentrações de cobre no solo e nas folhas de *Tecoma stans*. As barras estreitas representam o intervalo de desvio padrão



As letras diferentes em cima das barras indicam diferenças estatísticas pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$)

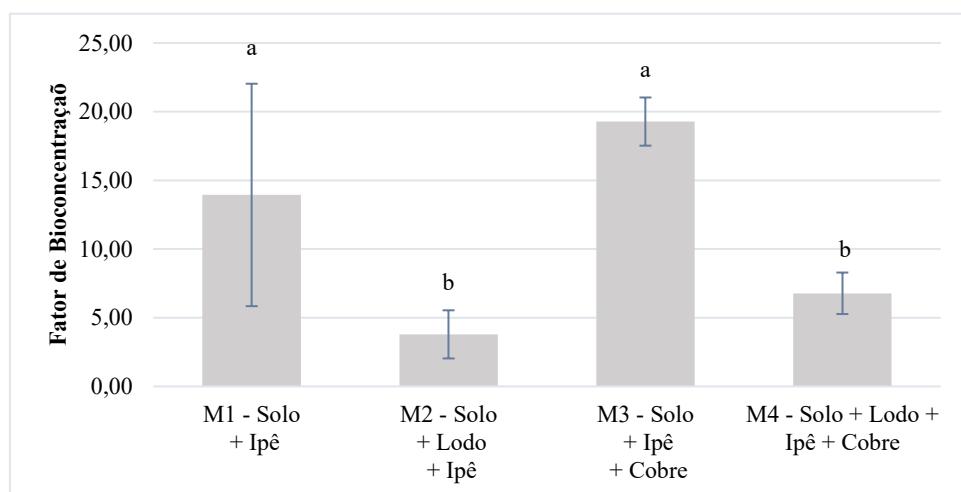
Fonte: O autor, 2025.

Os tratamentos contaminados com cobre (M3 e M4) apresentaram as maiores médias de concentração de cobre nas folhas em relação aos demais. A média de concentração de cobre nas folhas de *Tecoma stans* variou de 3,62 mg/dm³ em M2 (solo, ipê-de-jardim, LETA) a 8,76 mg/dm³ em M3 (Solo + Ipê-de-jardim + Cobre) (Figura 40). A análise de variância (ANOVA) apresentou diferença significativa ($p = 0,0067$) entre os tratamentos, e o teste de Scott-Knott indicou diferença entre os tratamentos M3 (solo, ipê-de-jardim, cobre) e M2 (solo, lodo, ipê-de-jardim) e entre M2 e M4 (solo, lodo, ipê-de-jardim, cobre), indicando que o lodo dificulta a absorção dos metais pela planta.

3.3 Fitorremediação de cobre por *Tecoma stans*

Os tratamentos M1 (solo, ipê-de-jardim) e M3 (solo, ipê-de-jardim, cobre) apresentaram as maiores médias de FBC (Figura 40) e são estatisticamente iguais, diferindo, estatisticamente de M2 (solo, lodo e ipê-de-jardim) e M4 (solo, lodo, ipê-de-jardim e cobre); dessa forma, pode-se concluir que o lodo elevou a concentração de cobre no solo e reduziu a capacidade da planta absorver o metal. No entanto, a concentração de Cu no solo não alcançou níveis de contaminação, mesmo nos tratamentos que receberam o cobre. Sendo assim, o resíduo influencia negativamente no potencial de absorção do cobre pela planta em condição de menor concentração de cobre no solo.

Figura 40 – Fator de Bioconcentração nos tratamentos com a presença do ipê-de-jardim, nela é expresso o potencial de fitorremediação baseado na razão entre concentração de cobre na planta pela concentração de cobre no solo



As barras estreitas representam o intervalo de desvio padrão. As letras minúsculas diferentes em cima das barras indicam diferenças estatísticas pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$)

Fonte: O autor, 2025.

4 CONCLUSÃO

O lodo de estação de tratamento de água (LETA) promoveu melhorias nas propriedades químicas do solo, com o aumento do pH e da soma de bases trocáveis, indicando um potencial de melhoria na fertilidade do solo. Entretanto, a aplicação do lodo em quaisquer dos tratamentos contribuiu para um aumento na disponibilidade do cobre no solo e menor absorção pelas plantas. Os tratamentos que receberam LETA apresentaram menor fator de bioconcentração (FBC) (3,79 no solo sem adição de cobre e 6,78 no tratamento com adição de cobre). Dessa forma, o LETA interferiu na capacidade de absorção dos metais pela planta, sendo um fator que desfavorece a absorção de cobre por *Tecoma stans*. Importante salientar que o solo apresentou alta capacidade de tamponamento de conteúdo adicionado de cobre no solo. Além disso, o LETA estimulou a disponibilidade de parte deste cobre e reduziu a extração pelas plantas.

Um maior tempo de crescimento vegetal, em diferentes solos com contaminação maior de cobre, pode confirmar se o LETA, associado ao crescimento de ipê-de-jardim, melhora a fitorremediação. Assim, torna-se necessária a realização de novos estudos, conduzidos por períodos de cultivo mais longos, a fim de permitir maior desenvolvimento das plantas, favorecendo o acúmulo de biomassa e, consequentemente, de metais. Sugere-se também, que seja feita análise do cobre nas raízes para medir o fator de translocação e, também, do lixiviado para verificar o potencial do lodo em manter o metal no solo.

REFERÊNCIAS

- ABBA, A. B. *et al.* Copper and Zinc Removal from Wastewater Using Alum Sludge Recovered from Water Treatment Plant. **Sustainability**, [s.l.], v. 14, n. 16, p. e9806, 9 ago. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14169806>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/16/9806>. Acesso em: 10 set. 2024
- ALMEIDA, M. B. G. *et al.* Evaluating centrifuged water treatment plant sludge as an adsorbent for nutrients, microorganisms, and heavy metals removal from wastewater. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 468, 25 august 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142975>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624024247>. Acesso em: 12 out 2025.
- ANAND, M.; BASAVARAJU, R. A review on phytochemistry and pharmacological uses of *Tecoma stans* (L.) Juss. ex Kunth. **Journal of Ethnopharmacology**, [s.l.], v. 265, 30 jan 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113270>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378874120331524>. Acesso em: 13 set 2025.
- ARAB, K. A. H. *et al.* 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**, [s.l.], v. 39, n. 6, p. e1277–1291, 1 may 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.4706>. Disponível em: <https://academic.oup.com/etc/article/39/6/1277/7735619>. Acesso em: 02 jun 2025.
- BHAT, S. A. *et al.* Phytoremediation of heavy metals un soil and water: An eco-friendly, sustainable and multidisciplinary approach. **Chemosphere**, [s.l.], v.303, set 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134788>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522012814>. Acesso em: 14 set 2025.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas. Brasília, DF, **Conama**, 30 dez. 2009. Disponível em:

<https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2017/09/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-acr.pdf> Acesso em: 03 out 2025.

CARMO, L. A. G. *et al.* Avaliação de lodo de estação de tratamento de água como adsorvente de contaminantes. In: XXXI CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, Pelotas, 2022. **Anais Eletrônicos** [...] Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2022. Disponível em:

<https://guaiaca.ufpel.edu.br/bitstream/handle/prefix/11215/AVALIA%C3%87%C3%83O%20DE%20LODO%20DE%20ESTA%C3%87%C3%83O%20DE%20TRATAMENTO%20DE%20C3%81GUA%20COMO%20ADSORVENTE%20DE%20CONTAMINANTES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 03 out 2025.

CHAUDHARY, S. *et al.* Microbes-mediated sulphur cycling in soil: Impact on soil fertility, crop production and environmental sustainability. **Microbiological Research**, [s.l.], v. 271, 24 feb 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127340>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0944501323000423>. Acesso em: 13 set 2025.

FILIPPOVIĆ, L. *et al.* Leached Copper Correlation with Dissolved Organic Carbon in Sloped Vineyard Soil. **Water**, Basel, v. 15, n. 4, 800, 17 feb 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15040800>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/4/800>. Acesso em: 4 out 2025.

JALALI, M. *et al.* Mono and Competitive Adsorption-Desorption of Cd, Co, Cu, and Zn in Ten Agricultural and Greenhouse Soils. **Soil and Sediment Contamination: An International Journal**, [s.l.], v. 33, n. 7, p. e976-999, 26 nov 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/15320383.2023.2283121>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15320383.2023.2283121>. Acesso em: 13 set 2025.

KAPOOR, D.; SINGH, M. P.10 – Heavy metal contamination in water and its possible sources. **Heavy Metals in the Environment: Impact, Assessment, and Remediation**, [s.l.], p. e179-189, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821656-9.00010-9>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/abs/pii/B9780128216569000109>. Acesso em: 12 out 2025.

LANGE, A. *et al.* Relações cálcio:magnésio e características químicas do solo sob cultivo de soja e milho. **Nativa**, [s.l.], v. 9, n. 3, p. e294-301, jun 2021. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v9i3.11526>. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/11526>. Acesso em: 14 set 2025.

LIANG, L. *et al.* Study on Properties of Copper-Contaminated Soil Solidified by Solid Waste System Combined with Cement. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 9, art. 5604, 6 may 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14095604>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/9/5604>. Acesso em: 12 out 2025.

LIMA, F. R. D. *et al.* Agronomic and environmental aspects of organo-mineral fertilizers produced with a by-product of the intermediate process of tanning. **Sec. Plant-Soil Interactions**, Lavras, v. 5, 3 ago 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1215448>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/agronomy/articles/10.3389/fagro.2023.1215448/full>. Acesso em: 2 jul 2025.

MARCO, R. *et al.* *Erythrina crista-galli* L. and peat in copper in soil phytoremediation. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. e475-490, Santa Maria, jan/mar 2021. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509818914>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/mDQX3PgzyMNTrc3BGjFQWNC/abstract/?format=html&lang=en>. Acesso em: 05 jul 2025.

MENDONÇA, A. T. *et al.* Potencial de remoção de cobre do solo por técnicas de fitorremediação. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [s.l.], v. 12, n. 4, p. e520-529, abr 2021. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.004.0040>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2021.004.0040>. Acesso em: 17 ago 2025.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1983. (Boletim Técnico, 81).

SHEN, X., *et al.* A critical review on the phytoremediation of heavy metals from environment: performance and challenges. **Chemosphere**, Qingdao, v. 291, 18 nov 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132979>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521034512>. Acesso em: 02 jun 2025.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2009.

SINGH, S. *et al.* A comprehensive review on ecology, life cycle and use of *Tecoma stans* (bignoneaceae). **Botanical Studies**, Ludhiana, v. 65, n. 6, 13 feb 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40529-024-00412-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40529-024-00412-4>. Acesso em: 04 jun 2025.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3^a ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

WANG, Z. *et al.* Mechanisms of S cooperating with Fe and Mn to regulate the conversion of Cd and Cu during soil redox process revealed by LDHs-DGT technology. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 867, 1 apr, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161431>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723000463>. Acesso em: 15 out 2025.

WEI, J. *et al.* Evaluating drinking water treatment residuals as an in-situ capping material for metal-contaminated sediments. **Chemosphere**, [s.l.], v. 368, nov 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143712>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653524026122>. Acesso em: 13 ago 2025.

APÊNDICE I

OBSERVAÇÃO DA GERMINAÇÃO DAS SEMENTES

Amostra	Data de observação – ABRIL A JULHO DE 2024										
	14/abr (semeadura)	22/abr	25/abr	01/mai	07/mai	14/mai	23/mai	03/jun	14/jun	24/jun	24/jul
TCA	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
TCB	0	0	2	2	2	2	3*	3	3	3	3
TCC	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
TCD	0	1	2	2	3	3	3	3	3	3	3
TCE	0	1	3	3	4	4	4	4	4	4	4
TCF	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T1A	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T1B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T1C	0	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
T1D	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3
T1E	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3
T1F	0	0	1	2	3	3	3	3	3	3	3
T2A	0	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
T2B	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T2C	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
T2D	0	0	2	2	3	3	3	3	3	3	3
T2E	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3
T2F	0	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
T3A	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
T3B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T3C	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
T3D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T3E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T3F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T4A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T4B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T4C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T4D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T4E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T4F	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1

*Última germinação