

**TOLERÂNCIA DE *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos AO
CHUMBO e NÍQUEL**

Victor Soares Rodrigues

Montes Claros - MG
Abril - 2025

Victor Soares Rodrigues

**TOLERÂNCIA DE *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos AO
CHUMBO E NÍQUEL**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Montes Claros como parte das exigências do Curso de Mestrado Acadêmico em Botânica Aplicada, área de concentração em Botânica Aplicada para a obtenção do título de Mestre.

Orientador(a): Profa. Dra. Maria das Dores Magalhães Veloso

Coorientador(a): Profa. Dra. Sônia Ribeiro Arrudas

Montes Claros - MG
Abril - 2025

R696t Rodrigues, Victor Soares.
Tolerância de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos ao Chumbo e Níquel [manuscrito] / Victor Soares Rodrigues. – Montes Claros, 2025.
92 f. : il.

Inclui bibliografia.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Montes Claros - Unimontes, Programa de Pós-Graduação em Botânica Aplicada /PPGBOT, 2025.

Orientadora: Profª. Dra. Maria das Dores Magalhães Veloso.
Coorientadora: Profª. Dra. Sônia Ribeiro Arrudas.

1. Bioacumulação. 2. Fitoestabilização. 3. Fitorremediação. 4. Restauração. 5. Ipê-roxo. I. Veloso, Maria das Dores Magalhães. II. Arrudas, Sônia Ribeiro. III. Universidade Estadual de Montes. IV. Título.

Victor Soares Rodrigues

**TOLERÂNCIA DE *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos AO
CHUMBO E NÍQUEL**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Montes Claros como parte das exigências do Curso de Mestrado Acadêmico em Botânica Aplicada, área de concentração em Botânica Aplicada para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 07 de MAIO de 2025.

Profa. Dra. Maria das Dores Magalhães Veloso - UNIMONTES
Prof. Dr. Geraldo Aclécio Melo – UNIMONTES
Prof. Dr. Luiz Arnaldo Fernandes - UFMG

Dra. Maria das Dores Magalhães Veloso
Orientadora

Montes Claros - MG
Abril - 2025

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha mãe, Hidelfonsa Soares da Silva.

À orientadora, Profa. Dra. Maria das Dores Magalhães Veloso.

À coorientadora, Profa. Sônia Ribeiro Arrudas.

Ao Laboratório de Bioprodutos.

Ao Laboratório de Ecologia Vegetal.

Ao Laboratório de Anatomia Vegetal.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes).

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig).

RESUMO

Tolerância de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos ao chumbo e níquel

As atividades antrópicas, como mineração, uso de combustíveis fósseis, aplicação de pesticidas e fertilizantes, além da geração de resíduos, têm contribuído significativamente para o aumento da concentração de elementos potencialmente tóxicos no ambiente. Alguns desses elementos, como níquel (Ni), magnésio (Mg) e cobalto (Co), são micronutrientes essenciais ao metabolismo vegetal. Outros, como chumbo (Pb) e mercúrio (Hg), não apresentam função biológica conhecida e podem induzir efeitos tóxicos mesmo em baixas concentrações. O desequilíbrio na concentração desses metais no ambiente é particularmente preocupante devido à sua natureza não biodegradável, o que favorece sua bioacumulação e biomagnificação ao longo da cadeia trófica, representando riscos ecotoxicológicos à saúde humana e aos ecossistemas. Nesse contexto, a fitorremediação tem se destacado como uma alternativa promissora para a remediação de solos contaminados. Trata-se de uma técnica ambientalmente sustentável, de baixo custo, que permite tanto a descontaminação quanto a revegetação de áreas degradadas. Diversas espécies vegetais têm sido empregadas em estratégias de fitorremediação, contudo, o uso de espécies nativas ainda é limitado, o que restringe a recuperação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos. *Handroanthus impetiginosus*, conhecida popularmente como “ipê-roxo” ou “lapacho”, pertencente à família Bignoniaceae, ganha destaque como uma espécie promissora para esse fim, porque apresenta ampla distribuição geográfica nos biomas brasileiros, alto valor ecológico e ornamental, além de já ser utilizada em projetos de restauração ambiental e apresentar tolerância a estresses induzidos por metais. Diante disso, o presente estudo avaliou o potencial de *H. impetiginosus* na fitorremediação de solos contaminados por diferentes concentrações de Pb (0, 72, 180, 300 e 900 mg kg⁻¹) e Ni (30, 70, 100 e 130 mg kg⁻¹). Foram investigados o impacto dos contaminantes na emergência, nos parâmetros biométricos, o surgimento de sintomas de intoxicação, alterações histoquímicas, anatômicas e a deposição de metal nos tecidos aéreos e radiculares. Para ambos os metais, observou-se que a espécie foi capaz de emergir e se desenvolver nas concentrações testadas, sem alterações significativas nos parâmetros biométricos. No experimento com Pb, modificações anatômicas e histoquímicas foram observadas na dose de 300 mg kg⁻¹, com colapso da região externa do córtex radicular e ausência de deposição de amido. Com relação ao Ni, houve aumento significativo nos teores de pigmentos fotossintéticos (clorofila a, b, total e carotenoides), com pico de concentração na dose de 70 mg kg⁻¹. O padrão de acúmulo foi semelhante para ambos os metais, com deposição predominante no sistema radicular. No entanto, fatores de bioconcentração superiores a 1 foram observados apenas nas maiores concentrações de Ni, o que indica alta capacidade da planta em acumular este metal no seu sistema radicular. Esses resultados indicam que *H. impetiginosus* apresenta potencial como espécie fitorremediadora, com destaque para sua aplicação na fitoestabilização de áreas contaminadas por Ni e Pb.

Palavras-chave: Bioacumulação; Fitoestabilização; Fitorremediação; Restauração; Ipê-roxo.

ABSTRACT

Tolerance of *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos to lead and nickel

Anthropogenic activities such as mining, the use of fossil fuels, the application of pesticides and fertilizers, as well as waste generation, have significantly contributed to the increased concentration of potentially toxic elements in the environment. Some of these elements, such as nickel (Ni), magnesium (Mg), and cobalt (Co), function as essential micronutrients for plant metabolism. Others, such as lead (Pb) and mercury (Hg), have no known biological role and may induce toxic effects even at low concentrations. The imbalance in the environmental concentrations of these metals is particularly concerning due to their non-biodegradable nature, which facilitates their bioaccumulation and biomagnification along the food chain, posing ecotoxicological risks to both human health and ecosystems. In this context, phytoremediation has emerged as a promising strategy for the remediation of metal-contaminated soils. It is an environmentally sustainable and cost-effective technique that enables both the decontamination and revegetation of degraded areas. Various plant species have been employed in phytoremediation strategies; however, the use of native species remains limited, which hinders the full recovery of biodiversity and ecosystem services. *Handroanthus impetiginosus*, commonly known as "ipê-roxo" or "lapacho", a member of the Bignoniaceae family, stands out as a promising species for this purpose. It exhibits a broad geographic distribution across Brazilian biomes, high ecological and ornamental value, and is already used in ecological restoration projects. Additionally, it demonstrates tolerance to metal-induced stress. For this reason, the present study evaluated the phytoremediation potential of *H. impetiginosus* in soils contaminated by different concentrations of Pb (0, 72, 180, 300 and 900 mg kg⁻¹) and Ni (30, 70, 100 and 130 mg kg⁻¹). The effects of metal exposure were assessed by analyzing seedling emergence, biometric parameters, the appearance of toxicity symptoms, histochemical and anatomical changes, and metal deposition in root and aerial tissues. For both metals, *H. impetiginosus* was able to emerge and grow under the tested concentrations without significant changes in biometric variables. In the Pb experiment, anatomical and histochemical modifications were observed at the 300 mg kg⁻¹ dose, including collapse of the outer cortex region of the root and absence of starch deposition. Regarding Ni, a significant increase in photosynthetic pigments (chlorophyll a, b, total, and carotenoids) was recorded, with peak values at 70 mg kg⁻¹. The accumulation pattern was similar for both elements, with predominant deposition in the root system. However, bioconcentration factors greater than 1 were observed only at the highest Ni concentrations. These results highlight the potential of *H. impetiginosus* as a phytoremediator species, particularly for the phytostabilization of areas contaminated with Ni and Pb.

Key words: Bioaccumulation; Phytoremediation; Phytostabilization; Purple trumpet tree; Restoration.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	10
2. REFERÊNCIAS	13
3. CAPITULO 1	16
4. RESUMO	17
5. INTRODUÇÃO.....	18
6. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
6.1. Coleta e seleção das sementes.....	20
6.2. Análise química do solo e condições atmosféricas	21
6.3. Desenho experimental.....	21
6.4. Emergência, parâmetros morfológicos e análise de sintomas	22
6.5. Análises anatômicas e histoquímicas	23
6.6. Digestão, estimativa do teor de chumbo, cálculo de FBC e FT	24
6.7. Análise estatística	24
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
7.1. Condições experimentais e propriedades químicas do solo	25
7.2. Efeito do chumbo na emergência e no desenvolvimento da plântula	26
7.3. Sintomas de intoxicação	29
7.4. Quantificação de chumbo nos tecidos, FBC e FT	32
7.5. Anatomia e histoquímica das raízes e folhas	35
7.6. Considerações sobre o experimento.....	42
8. CONCLUSÃO.....	43
9. REFERÊNCIAS	44
10. CAPÍTULO 2	51
11. RESUMO	52
12. INTRODUÇÃO.....	53
13. MATERIAL E MÉTODOS.....	56
13.1. Coleta e seleção das sementes.....	56
13.2. Análise química do solo e condições atmosféricas	56
13.3. Desenho experimental.....	57
13.4. Parâmetros de emergência de plântulas de <i>H. impetiginosus</i>	57
13.5. Biometria e análise dos sintomas de intoxicação	58
13.6. Teor de pigmentos fotossintéticos.....	58
13.7. Digestão, estimativa do teor de níquel, cálculo de FBC e FT	59
14. Análise estatística	60
15. RESULTADOS	60
15.1. Condições experimentais e propriedades químicas do solo	60

15.2. Efeito do níquel na emergência e no desenvolvimento da plântula	61
15.3. Biometria e análise dos sintomas	63
15.4. Sintomas de intoxicação	65
15.5. Teor de clorofila a, b, totais e carotenoides	67
15.6. Quantificação de níquel nos tecidos, FBC e FT	67
16. DISCUSSÃO	69
17. CONCLUSÃO	73
18. REFERÊNCIAS	74
19. CONCLUSÃO GERAL	78
20. ANEXO 1 – NORMAS DE SUBMISSÃO DA REVISTA (CAPÍTULO 1)	79
21. ANEXO 2 – NORMAS DE SUBMISSÃO DA REVISTA (CAPÍTULO 2)	84

INTRODUÇÃO GERAL

O avanço das atividades industriais, a mineração, o uso intensivo de fertilizantes e o descarte inadequado de resíduos urbanos têm aumentado significativamente a concentração de elementos potencialmente tóxicos no meio (Usman et al., 2020), transformando o solo em sumidouros de metais (Gascó et al., 2020) e tornando esta uma das mais urgentes questões para a agenda global de desenvolvimento sustentável (Usman et al., 2020).

Isso ocorre porque, tais metais, como o chumbo (Pb) e o níquel (Ni), dentre outros, têm densidade, massa e número atômico elevados (Yan et al., 2020), e, quando acumulados em concentrações elevadas nos solos e cursos d'água, comprometem o uso desses recursos para fins diversos, como cultivo, irrigação e abastecimento, uma vez que podem se bioacumular e biomagnificar ao longo da cadeia trófica (Moreno-Rubio et al., 2022; Ali; Khan; Sajad, 2013).

O Ni, por exemplo, é um micronutriente essencial ao metabolismo vegetal que, requerido em pequenas quantidades, integra enzimas importantes, como a urease e a superóxido dismutase, contudo, em concentrações elevadas, apresenta efeitos fitotóxicos, como inibição do crescimento, redução da germinação, dos teores de clorofila, além de indução do estresse oxidativo (Tang et al., 2022; Pishchik et al., 2021; Hassan et al., 2019; Mustafa et al., 2023).

Já o Pb, por outro lado, não tem função conhecida nos organismos vivos. No entanto, por ser amplamente utilizado, é considerado pela frequência, toxicidade e exposição um contaminante prioritário (ATSDR, 2022), que interfere negativamente em processos fisiológicos essenciais dos vegetais, desde a germinação até a produtividade, impactando relações hídricas, nutricionais e induzindo o estresse oxidativo (Zulfigar et al., 2019). Tais metais não são biodegradáveis e sua persistência, no ambiente, aumenta o risco de sua absorção por organismos vivos, com implicações ecotoxicológicas e de saúde pública (Werle et al., 2017; Mustafa et al., 2023)

Muitas técnicas, tanto físicas, quanto químicas, são usadas para remover metais do ambiente, bem como revegetar áreas poluídas. Dentre elas, pode-se citar a filtração por membrana, a osmose reversa, a substituição do solo, a lavagem, incineração etc. No entanto, elas comumente são caras, podem alterar irreversivelmente as propriedades do solo e gerar poluentes secundários (Sharma et al., 2021; Mustafa et al., 2023; Aparicio et al., 2022).

Diante das limitações das técnicas convencionais, a busca por alternativas sustentáveis tem impulsionado o uso da biorremediação. Entre suas vertentes, a fitorremediação, uma abordagem biotecnológica baseada em plantas, ganha destaque por ser econômica, ecologicamente correta, com potencial para reabilitação ambiental e recuperação de ecossistemas (Rocha et al., 2022; Khan et al., 2022).

A fitorremediação envolve diferentes estratégias, como fitoextração, fitoestabilização, fitovolatilização, fitodegradação e fitofiltração (Latif et al., 2023; Khan et al., 2022), cuja eficiência depende, entre outros fatores, da escolha de espécies vegetais com características adaptativas específicas, como tolerância ao metal, rápido crescimento, produção de biomassa, sistema radicular vigoroso e resistência a herbivoria (Yan et al., 2020; Latif et al., 2023).

Espécies ornamentais, por sua vez, são alternativas promissoras por não serem destinadas ao consumo humano ou animal, evitando ou minimizando a introdução de contaminantes na cadeia alimentar, ao mesmo tempo em que agregam valor paisagístico e contribuem para a requalificação estética de áreas degradadas (Rocha et al., 2022).

Nesse contexto, o uso de espécies arbóreas nativas é particularmente interessante, porque podem contribuir não apenas com a descontaminação das áreas, mas também apoiar a recuperação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos.

Preenchendo ambos os requisitos, uma espécie estratégica para fins de remediação é *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos Mattos, árvore conhecida popularmente

como ipê-roxo, lapacho, pau'darco, que pertencente à família Bignoniaceae e que apresenta ampla distribuição geográfica nos biomas brasileiros, alto valor ecológico, ornamental e econômico, além de elevada resistência a altas doses de metais (Gai; Santos; Vieira., 2017; Meyer et al., 2016) com potencial uso em projetos de reflorestamentos de áreas de mineração (Santos et al., 2020).

Portanto, tendo em vista a importância da seleção de espécies vegetais adaptadas a ambientes contaminados, este estudo visa investigar o impacto de diferentes concentrações de Ni e Pb na emergência e no desenvolvimento inicial de *H. impetiginosus*, buscando avaliar seu potencial uso como fitorremediador de solos contaminados. Para isso, foram conduzidos dois experimentos em casa de vegetação.

O primeiro experimento dedicou-se a investigar a emergência, os parâmetros biométricos, alterações anatômicas e o padrão de deposição de Pb em folhas e raízes de *H. impetiginosus* que cresceram em mistura substrato orgânico e areia (2:1) contaminado por nitrato de chumbo ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) durante 2 meses. O segundo experimento, por sua vez, analisou os parâmetros de emergência, a biometria, a toxicidade, o conteúdo de pigmentos fotossintéticos e o teor de Ni nas folhas e raízes de *H. impetiginosus* cultivadas durante 4 meses em uma mistura de solo e areia (2:1) contaminados por acetato de níquel(II) tetra hidratado ($\text{Ni}(\text{OCOCH}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Em ambos experimentos, foram utilizados os limites de metais indicados para áreas de referência, agrícolas, residenciais e industriais, consoante legislação do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Brasil, 2009).

REFERÊNCIAS

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY (ATSDR). Priority list of hazardous substances. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, 2022. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/programs/substance-priority-list.html>

ALI, Muhammad; NAS, Farouk S. The effect of lead on plants in terms of growing and biochemical parameters: a review. **MOJ Ecology & Environmental Sciences**, v. 3, n. 4, 2018. Disponível em: <https://medcraveonline.com/MOJES/the-effect-of-lead-on-plants-in-terms-of-growing-and-biochemical-parameters-a-review.html>

APARICIO, Juan Daniel; RAIMONDO, Enzo Emanuel; SAEZ, Juliana María; *et al.* The current approach to soil remediation: A review of physicochemical and biological technologies, and the potential of their strategic combination. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 2, p. 107141, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343722000148>

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 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 por essas substâncias. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 249, p. 81–84, 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-acs.pdf>

KRISHNASAMY, Selvanayaki; LAKSHMANAN, Ramkumar; RAVICHANDRAN, Mythili. Phytoremediation of Metal and Metalloid Pollutants from Farmland: An *In-Situ* Soil Conservation. *In: Biodegradation Technology of Organic and Inorganic Pollutants*. [s.l.]: IntechOpen, 2021. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/77409>

GAI, Ana Paula Camargo; DOS SANTOS, Daniela Soares; VIEIRA, Evandro Alves. Effects of zinc excess on antioxidant metabolism, mineral content and initial growth of *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos and *Tabebuia roseoalba* (Ridl.) Sandwith. *Environmental and Experimental Botany*, v. 144, p. 88–99, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847217302216>

GASCÓ, G.; ÁLVAREZ, M.L.; PAZ-FERREIRO, J.; *et al.* Combining phytoextraction by *Brassica napus* and biochar amendment for the remediation of a mining soil in Riotinto (Spain). *Chemosphere*, v. 231, p. 562–570, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004565351931080X>

HASSAN, Muhammad Umair; CHATTHA, Muhammad Umer; KHAN, Imran; *et al.* Nickel toxicity in plants: reasons, toxic effects, tolerance mechanisms, and remediation possibilities— a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 13, p. 12673–12688, 2019. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11356-019-04892-x>

KHAN, Q.; ZAHOOR, M.; SALMAN, S. M.; *et al.* Phytoremediation of toxic heavy metals in polluted soils and water of Dargai District Malakand Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. **Brazilian Journal of Biology**, v. 84, p. e265278, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjb/a/zGbwhqpvR3VTS65Kxz48wh/>

LATIF, Abdul; ABBAS, Aown; IQBAL, Javed; *et al.* Remediation of environmental contaminants through phytotechnology. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 234, n. 3, p. 139, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06112-2>

MEYER, Sylvia Therese; CASTRO, Samuel Rodrigues; FERNANDES, Marcus Manoel; *et al.* Heavy-metal-contaminated industrial soil: Uptake assessment in native plant species from Brazilian Cerrado. **International Journal of Phytoremediation**, v. 18, n. 8, p. 832–838, 2016. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15226514.2016.1146224>

MORENO-RUBIO, Nataly; ORTEGA-VILLAMIZAR, Daniela; MARIMON-BOLÍVAR, Wilfredo; *et al.* Potential of Lemna minor and Eichhornia crassipes for the phytoremediation of water contaminated with Nickel (Ii). **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 1, p. 119, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10688-3>

MUSTAFA, Adnan; ZULFIQAR, Usman; MUMTAZ, Muhammad Zahid; *et al.* Nickel (Ni) phytotoxicity and detoxification mechanisms: A review. **Chemosphere**, v. 328, p. 138574, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004565352300841X>

PISHCHIK, Veronika; MIRSKAYA, Galina; CHIZHEVSKAYA, Elena; *et al.* Nickel stress-tolerance in plant-bacterial associations. **PeerJ**, v. 9, p. e12230, 2021. Disponível em: <https://peerj.com/articles/12230>

ROCHA, Camila Silva; ROCHA, Daiane Cristina; KOCHI, Leticia Yoshie; *et al.* Phytoremediation by ornamental plants: a beautiful and ecological alternative. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 3, p. 3336–3354, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17307-7>

SHARMA, Pooja; TRIPATHI, Sonam; PURCHASE, Diane; *et al.* Integrating phytoremediation into treatment of pulp and paper industry wastewater: Field observations of native plants for the detoxification of metals and their potential as part of a multidisciplinary strategy. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, p. 105547, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343721005248>

TANG, Zhong; WANG, Han-Qing; CHEN, Jie; *et al.* Molecular mechanisms underlying the toxicity and detoxification of trace metals and metalloids in plants. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 65, n. 2, p. 570–593, 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jipb.13440>

USMAN, Kamal; AL JABRI, Hareb; ABU-DIEYEH, Mohammed H.; *et al.* Comparative assessment of toxic metals bioaccumulation and the mechanisms of chromium (Cr) tolerance and uptake in calotropis procera. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020. Disponível em:

<https://www.frontiersin.orghttps://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2020.00883/full>

WERLE, Sebastian; BISORCA, Daniel; KATELBACH-WOŹNIAK, Anna; *et al.* Phytoremediation as an effective method to remove heavy metals from contaminated area – TG/FT-IR analysis results of the gasification of heavy metal contaminated energy crops. **Journal of the Energy Institute**, v. 90, n. 3, p. 408–417, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1743967115303354>

YAN, An; WANG, Yamin; TAN, Swee Ngin; *et al.* Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020. Disponível em: <https://www.frontiersin.orghttps://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2020.00359/full>

ZULFIQAR, Usman; FAROOQ, Muhammad; HUSSAIN, Saddam; *et al.* Lead toxicity in plants: Impacts and remediation. **Journal of Environmental Management**, v. 250, p. 109557, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719312757>

CAPITULO 1

Artigo formatado de acordo com a Revista Ciência e Agrotecnologia

TOLERÂNCIA DE *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos AO CHUMBO

Victor Soares Rodrigues; Sônia Ribeiro Arrudas; Maria das Dores Magalhães Veloso

RESUMO

Ambientes contaminados por metais potencialmente tóxicos representam risco à saúde humana e ao meio ambiente, posto que estes podem se bioacumular e biomagnificar ao longo da cadeia trófica. Uma alternativa à descontaminação destes ambientes é a fitorremediação, abordagem econômica e sustentável, que utiliza plantas a fim restaurar áreas degradadas. Embora diversas espécies sejam frequentemente empregadas, há uma lacuna no estudo de espécies nativas competentes, o que restringe a recuperação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos. Com o fim de superar tal obstáculo, foi conduzido um experimento de 60 dias, em casa de vegetação, onde avaliou-se a emergência, a biometria, os sintomas visuais de intoxicação, o acúmulo de metais nos tecidos e as alterações histoquímicas e anatômicas de plântulas de *Handroanthus impetiginosus* crescendo em diferentes concentrações de nitrato de chumbo ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) conforme legislação do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Os resultados indicaram um leve efeito positivo da concentração deste sal na emergência da espécie, mas sem impacto nos parâmetros biométricos. Os sintomas de intoxicação, clorose, atrofia e lâmina foliar modificada apareceram bem distribuídos no grupo Controle e nos tratamentos, T72, T180 e T300. O grupo Controle aparentou ter um parênquima paliçádico menos desenvolvido, enquanto o tratamento T300 não mostrou deposição de amido nas raízes. O método de ditizona permitiu identificar deposição de Pb na nervura central das folhas, especialmente, nos vasos do xilema e nas fibras, mas não na região do mesófilo. Já sobre as raízes, o Pb foi intensamente visível na região do cilindro vascular e, em menor grau, impregnado às paredes das células do córtex. Com relação ao teor de metais, os fatores de bioconcentração e translocação apontam que a espécie acumula Pb majoritariamente no sistema radicular. Os achados demonstram que o *Handroanthus impetiginosus* é uma espécie tolerante ao Pb, podendo emergir e se desenvolver em solos contaminados, o que possibilita o uso desta espécie na estabilização do solo e na recuperação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos em áreas contaminadas.

Termos de indexação: Chumbo, ditizona, fitoestabilização, resiliência.

INTRODUÇÃO

A deposição antropogênica de metais potencialmente tóxicos no ambiente ganhou destaque como uma das prementes questões que desafiam a agenda global de desenvolvimento sustentável (Usman et al., 2020). Estes metais, já denominados como metais pesados, são conhecidos por sua alta densidade, massa e número atômico (Yan et al., 2020) e, se dispostos inadequadamente no ambiente, contaminam os cursos d'água e o solo, comprometendo o uso desses recursos para diversos fins, como consumo, cultivo, irrigação, recreação, posto que se bioacumulam e biomagnificam ao longo da cadeia trófica (Moreno-Rubio et al., 2022).

Portanto, áreas contaminadas representam um risco significativo aos ecossistemas, uma vez que são fontes de poluição que podem resultar em efeitos ecotoxicológicos. A contaminação do solo é encontrada prioritariamente próxima a aterros sanitários e atividades industriais que disseminam tais poluentes, como as indústrias petrolíferas, de fertilizantes, mineração, fundição e queima de combustíveis fósseis (Werle et al., 2017; Usman et al., 2020).

Várias técnicas físicas e químicas são usadas com o intuito de remover contaminantes metálicos do ambiente, como filtração por membrana, osmose reversa, biorreatores ou métodos oxidativos avançados. No entanto, essas técnicas geralmente são caras, exigem muita energia, podem danificar o solo e gerar poluentes secundários (Sharma et al., 2021). Diante disso, a demanda por tecnologias alternativas tornou imperativa a busca e a exploração de diferentes técnicas de base biológica: a biorremediação. Sabe-se que o uso de agentes biológicos é relativamente barato, seguro e tem efeitos adversos limitados ou nulos no ecossistema. A biorremediação abrange a bioaugmentação, a bioventilação, a compostagem e a fitorremediação (Usman; Al-ghouti; Abu-dieyeh, 2019).

Dentre essas, a fitorremediação, técnica biotecnológica baseada em plantas, tem ganhado muito destaque como abordagem econômica, ambientalmente correta (Rocha et al.,

2022), aplicável em larga escala, que é usada tanto para mitigar danos ambientais, como revegetar áreas contaminadas (Yan et al., 2020). As principais estratégias de fitorremediação incluem a fitoestabilização, a fitoextração, a fitovolatilização, fitofiltração (Latif et al., 2023; Khan et al., 2022) e fitodegradação.

A seleção de espécies de plantas competentes à remediação de áreas contaminadas é uma etapa importante. E, embora as variáveis possam mudar entre as estratégias adotadas, em geral, a matriz escolhida deve ser tolerante ao contaminante, repulsiva aos herbívoros, possuir rápido crescimento com ganho de biomassa, além de sistema radicular robusto capaz de estabilizar e evitar a erosão do solo (Yan et al., 2020; Latif et al., 2023).

Plantas como girassóis, choupos, salgueiros e gramíneas têm sido usadas e exibem bons resultados na remediação de zonas contaminadas (Werle et al., 2017). No entanto, ainda são restritos os estudos que investigam as espécies nativas competentes à fitorremediação (Sharma et al., 2021). Estas espécies poderiam não só contribuir com a descontaminação das áreas poluídas, como também apoiar seu reflorestamento e a recuperação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos, como refúgio à fauna e regulação do clima.

Com essa premissa, o objetivo deste estudo foi investigar o impacto de diferentes dosagens de Pb na emergência e no desenvolvimento inicial de *Handroanthus impetiginosus* com o intuito de avaliar seu uso como espécie fitorremediadora. A escolha desta espécie associa-se à sua condição de árvore nativa do Brasil, usada em projetos de reflorestamento, que tem valor ornamental pela sua beleza e comercial pela sua madeira de qualidade.

A seleção de Pb como contaminante deve-se ao fato de ser um metal capaz de afetar nocivamente os ecossistemas de todo globo (Chandrasekhar; Ray, 2019), considerado com base na frequência, toxicidade e exposição a humanos, o segundo contaminante prioritário (ATSDR,

2022). Em vegetais, o Pb impacta a germinação até o rendimento das culturas, interrompendo as relações hídricas, nutricionais e induzindo o estresse oxidativo (Zulfigar et al., 2019).

A tolerância de *H. impetiginosus* ao Pb foi investigada em um experimento com duração de 60 dias. Foram avaliadas a emergência (%), variáveis biométricas (altura aérea, comprimento da raiz, diâmetro do caule, massa seca aérea, massa seca radicular e área foliar), além do Índice de Qualidade de Dickson e Índice de Tolerância. Também foram observados sintomas de intoxicação, alterações anatômicas, histoquímicas, e o padrão de acúmulo de metais nos tecidos vegetais por meio de espectroscopia de absorção atômica. A hipótese proposta é que o *H. impetiginosus* é capaz de emergir e crescer em solos contaminados por Pb, podendo acumulá-lo nos seus tecidos.

MATERIAL E MÉTODOS

Coleta e seleção das sementes

Frutos de *H. impetiginosus* em fase final de deiscência, foram coletados de um indivíduo adulto próximo ao parque Veredas do Peruaçu (15°13'43. "S, 44°55'.6°W), na região de Água Doce-MG, e secos ao ambiente até completarem a deiscência (Almeida et al., 2020). Em seguida, as sementes sem sinais de predação foram selecionadas manualmente e armazenadas até o uso. Uma amostra botânica, folhas e frutos, foi enviada ao Herbário MCMG, para identificação e depósito da espécie (MCMG 8572). A pesquisa foi registrada no Sistema Nacional de Gestão do Patrimônio Genético e do Conhecimento Tradicional Associado (SisGen) (A09233A).

Análise química do solo e condições atmosféricas

O meio de cultivo empregado foi uma mistura de substrato orgânico comercial Mogifertil[®] (pinus, turfa, casca de eucalipto) e areia autoclavada (2:1) (120 °C, 30 min). As propriedades químicas foram determinadas de acordo com Teixeira et al., (2017). O pH em água foi utilizado para avaliar a acidez ativa. O carbono orgânico foi quantificado pelo método de Walkley & Black. Os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) trocáveis foram obtidos por solução de KCl 1 mol L⁻¹ e titulação com EDTA. O alumínio e acidez trocável foram determinados pelo método de KCl 1 mol L⁻¹, com titulação utilizando NaOH. A acidez potencial (H+Al) foi avaliada pelo método de acetato de cálcio [Ca(OAc)₂] 0,5 mol L⁻¹. O fósforo (P) disponível foi analisado com o extrator Mehlich-1 e medido por colorimetria, já o fósforo remanescente foi determinado a partir do fósforo em solução de equilíbrio, também o por colorimetria. O potássio (K) disponível foi quantificado adotando-se o extrator Mehlich-1 por fotometria de chama. As condições atmosféricas aproximadas, temperatura e umidade, durante o experimento, foram obtidas do Instituto Nacional de Meteorologia (<https://portal.inmet.gov.br/>).

Desenho experimental

O experimento teve delineamento inteiramente casualizado e foi realizado em casa de vegetação, sob sombrite, no Laboratório de Ecologia Vegetal (Leve) da Universidade Estadual de Montes Claros (Unimontes). Ele foi conduzido em vasos de polipropeno, 42 repetições por tratamento, contendo 515 g de substrato preparado por amostra. Excluindo-se o grupo Controle, os vasos foram contaminados com solução de Pb(NO₃)₂ até atingir as dosagens de Pb de 72, 180, 300 e 900 mg kg⁻¹ (0,179, 0,447, 0,746, 2,238 mmol L⁻¹), conforme resolução 420 de 2009 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), referente às dosagens de investigação,

agrícola, residencial e industrial (Brasil, 2009). Posteriormente, em cada repetição, semeou-se três sementes de *H. impetiginosus* com hilo voltado para baixo. Os vasos foram irrigados manualmente a cada 3 dias, mantendo-se a capacidade de campo em 60%.

Emergência, parâmetros morfológicos e análise de sintomas

Após 30 dias, contabilizou-se a emergência (%) e foi realizado o desbaste, deixando exclusivamente um indivíduo por vaso para evitar a competição por recursos. Transcorrido 60 dias do início do experimento, amostrou-se aleatoriamente 18 plântulas por tratamento para biometria. Os indivíduos foram lavados em água destilada e separadas em parte aérea e radicular.

As variáveis biométricas mensuradas incluíram o número de folhas (NF); a altura da parte aérea (AA) (cm) mensurada em régua; o diâmetro do caule (DC) (mm) analisado com um paquímetro digital (MTX-316119); a massa seca aérea (MSA) e radicular (MSR) e total (MST) (g) determinada em balança analítica (AD330-Marte Científica), após secagem em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por 72h; e a área foliar (AF) (cm²) coletando-se (1-2) folhas do segundo nó, escaneando-as e processando-as com o software ImageJ®, onde os pixels foram transformados em cm² (Gai; Santos; Vieira., 2017). O índice de tolerância (IT) (Shi et al., 2011) e de qualidade de Dickson (IQD) (Dickson; Leaf; Hosner., 1960) foram mensurados, segundo equações descritas abaixo.

$$IT = \frac{\text{Biomassa do tratamento (g)}}{\text{Biomassa controle(g)}}$$

$$IQD = \frac{MST (g)}{\frac{AA (cm)}{DC (mm)} + \frac{MSA (g)}{MSR (g)}}$$

Os indivíduos amostrados também foram investigados quanto a sintomas visuais de intoxicação, avaliando-se a presença de clorose internerval, atrofia dos membros, lâmina foliar modificada e necrose das bordas e ápices (Gai; Santos; Vieira., 2017).

Análises anatômicas e histoquímicas

Uma folha da região do segundo nó e uma raiz de todos os tratamentos foram selecionados aleatoriamente para análise foliar, nervura e limbo, e da região mediana da zona de alongamento da raiz. Estes materiais foram fixados em Karnovsky (Karnovsky, 1965), desidratados em série etanólica (5, 10, 20, 30, 70, 80, 90 e 95%) e infiltrados em metacrilato de 2-hidroxietila (Leica Microsystems, Heidelberg, Alemanha) (Paiva et al. 2011). Após o endurecimento da resina, ele foi cortado (3 mm) em micrótomo rotativo (Lupetec MRP 2015), corado com *Toluidine Blue* a 0,05%, pH 4,7 (O'Brien et al. 1964) e montado em uma lâmina de resina acrílica para avaliação anatômica. Sobre os testes histoquímicos, os cortes foram marcados com *Lugol* para identificar a deposição de amido (Johansen, 1940); *Xylidine-Ponceau* para proteínas (Vidal 1970) e *Sudan Black* para lipídios (Johansen 1940).

Para identificação de deposição de Pb, foram manipuladas mudas da mesma espécie, aproximadamente 12 cm de altura. Elas foram incubadas em solução de $Pb(NO_3)_{2(aq)}$, 5 mmol L^{-1} , por 48h e, limpas em água destilada e, posteriormente, realizou-se cortes à mão livre da nervura central de folíolos centrais de folhas compostas (1-3 folíolos) e de raízes laterais. Este material foi corado por solução de Ditizona, cristal preto-arroxeadado que, na presença de Pb, transforma-se em um sal vermelho insolúvel (Seregin; Ivanov., 1997) e comparado ao tratamento Controle, cultivado unicamente com água destilada. Foram consideradas cinco repetições por tratamento.

Digestão, estimativa do teor de chumbo, cálculo de FBC e FT

Para a análise de metal nas folhas, foram misturados, em Erlenmeyer de 125 mL, 0,5 g de pó seco e triturado a 15 mL de HNO_{3(aq)} P.A 65% (v/v) com o sistema aquecido a 180 °C durante 60 minutos. Já as raízes e o solo foram processados adicionando 0,5 g deste material, seco e triturado, a 10 mL HNO_{3(aq)} P.A 65% (v/v) em aquecimento por 30 min a 190°C e, posteriormente, por 15 min a 200 °C. Os extratos obtidos foram filtrados, recuperados em volume final de 25 mL com água ultrapura e armazenados até as análises. A quantificação de Pb foi determinada em Espectrômetro de Absorção Atômica (AAS 240 FS) no modo chamadas, elaborando-se uma curva analítica e o limite de quantificação (LQ) foi de 0,500 mg L⁻¹. Os valores de metais nos tecidos obtidos foram usados com a finalidade de se determinar o Fator de Bioconcentração (FBC) e o Fator de Translocação (FT), conforme equação abaixo:

$$FBC = \frac{(\text{Metal nas raízes } mg \text{ kg}^{-1})}{(\text{Metal no solo } mg \text{ kg}^{-1})}$$

$$FT = \frac{(\text{Metal nas folhas } mg \text{ kg}^{-1})}{(\text{Metal nas raízes } mg \text{ kg}^{-1})}$$

Análise estatística

Os dados biométricos, FBC e FT foram avaliados quanto à distribuição, teste de Shapiro-Wilk, e homoscedasticidade, teste de Levene. Quando esses pressupostos foram atendidos, utilizou-se a análise de variância (ANOVA) e, se $p < 0,05$, o pós-teste de Tukey. Do contrário, usou-se o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis, com pós-teste de Dunn corrigido por Bonferroni, para as comparações múltiplas. Os sintomas foram avaliados de forma descritiva, já o teor de metal nos tecidos foi comparado empregando-se o teste de Student para amostras pareadas. O efeito das dosagens, na emergência e na massa seca, foi investigado

adotando-se a regressão linear simples após transformação dos dados em porcentagem. As análises foram conduzidas no software R (4.4.1).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Condições experimentais e propriedades químicas do solo

As condições atmosféricas, durante o experimento, apresentaram variação de temperatura entre 17,2 °C (min) e 36,2 °C (max). A umidade relativa do ar oscilou entre 21% (min) e 92% (max). A região onde o estudo foi realizado possui, segundo Köppen, clima Aw, caracterizado por uma estação chuvosa no verão, período durante o qual o experimento foi executado (Figura 1).

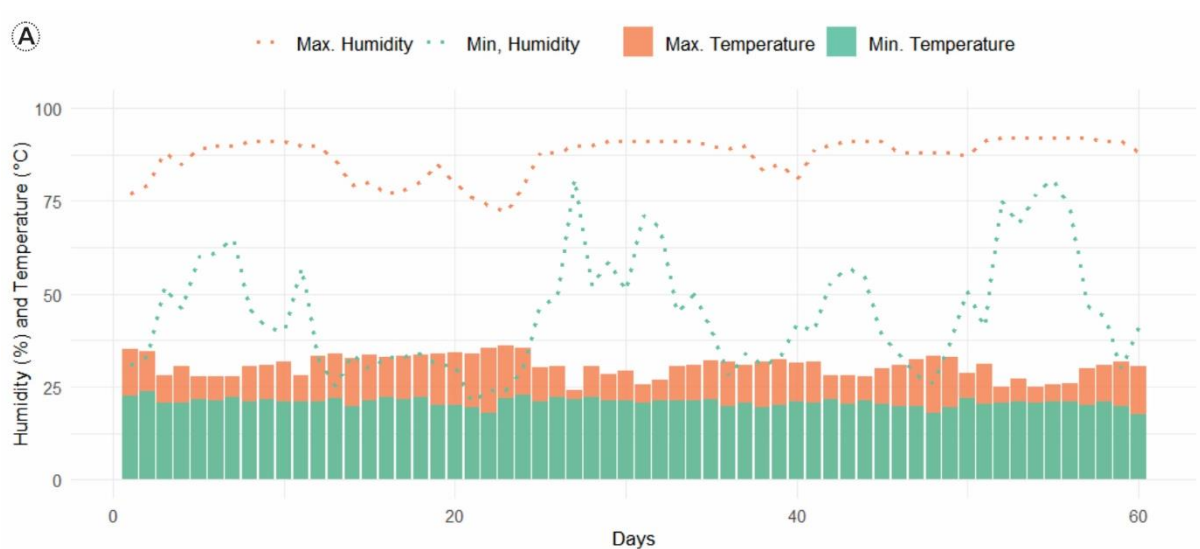


Figura 1. Climograma das condições atmosféricas durante a realização do experimento e tabela com as propriedades químicas do solo.

O substrato utilizado possui uma alcalinidade fraca pH (7,7), e elevados teores de nutrientes. As demais propriedades são indicadas abaixo (Tabela 1).

Atributo	Unidade	Valor
pH em água	-	7,7
P Mehlich	mg dm ⁻³	30
P remanescente	mg L ⁻¹	36,6
K	mg dm ⁻³	470,9
Ca	cmolc dm ⁻³	7,08
Mg	cmolc dm ⁻³	1,63
Al	cmolc dm ⁻³	0
H + Al	cmolc dm ⁻³	0,92
SB	cmolc dm ⁻³	9,92
t	cmolc dm ⁻³	9,92
M	%	0
T	cmolc dm ⁻³	10,84
V (%)	%	91,49
Mat. Org.	dag kg ⁻¹	2,37
Carbono Org.	dag kg ⁻¹	1,37

Efeito do chumbo na emergência e no desenvolvimento da plântula

Nesta análise, o grupo Controle (19,04%) e os tratamentos de concentrações de Pb, T72 (23,25%), T180 (17,05%) e T300 (20,15%) tiveram valores percentuais de emergência inferiores ao tratamento de maior concentração, T900 (45,23%) (Figura 2A). Com o objetivo de entender o efeito da dosagem de Pb na emergência, foi construída uma análise de regressão (Figura 2B).

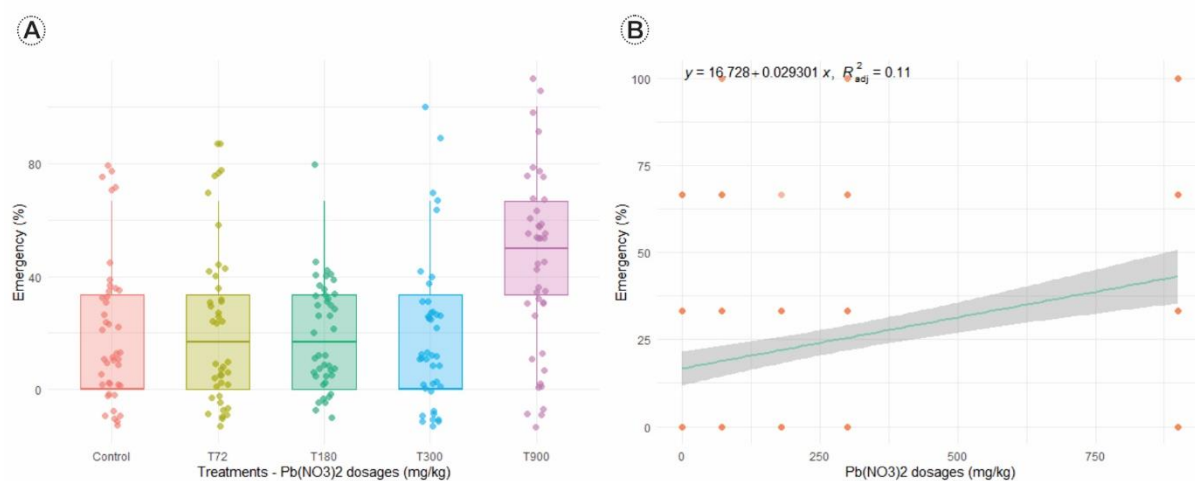


Figura 2: Boxplot descritivo do percentual de plântulas emergidas por tratamento (A) e regressão linear simples que relaciona a variável independente contínua, dosagens de Pb(NO₃)₂, com a variável resposta, emergência (%).

O modelo ajustado é estatisticamente significativo e evidencia uma relação linear positiva limitada entre as variáveis analisadas. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,1127$) indica que apenas 11,27% da variação observada na emergência é explicada pela dosagem de $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$. O intercepto estimado (16,73) representa o valor médio esperado da emergência quando o valor do tratamento é zero ($p = 1,25e^{-10}$). O coeficiente associado à variável contínua (0,029) sugere que, para cada unidade adicional, a emergência aumenta, em média, 0,029 unidades ($p = 6,35e^{-07}$).

A emergência de uma planta, momento em que ela se torna visível sobre o solo, é um marcador fenológico do seu desenvolvimento (Das et al., 2023). Dados, disponíveis na literatura, descrevem que este fenômeno é afetado adversamente pelo $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ em sementes de *Triticum aestivum* L., estabelecendo-se uma relação dose-dependente em quantidades superiores a $0,3 \text{ mmol L}^{-1}$ (Lamhamdi et al., 2011). Concentrações mais altas, $4,4 \text{ mmol L}^{-1}$, são capazes de reduzir a germinação de sementes de alfafa em 50%, como também suprimir o seu desenvolvimento radicular e aéreo (Yahaghi et al., 2019).

Aqui, observou-se um efeito contrário, com o $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ induzindo um leve aumento na emergência de *H. impetiginosus*, particularmente, próximo ao tratamento de maior dosagem T900. Acredita-se que a tolerância das sementes ao efeito dos metais tóxicos na germinação possa estar relacionada à proteção do embrião pelo tegumento (Li et al., 2005), que o protege da entrada de Pb até que o desenvolvimento da radícula rompa a testa, fazendo com que ele seja absorvido, rapidamente, na região meristemática da radícula e do hipocótilo (Nas; Ali., 2018; Ur Rahman et al., 2024). Apesar disso, a ausência de impacto na germinação ou nos parâmetros biométricos podem não servir como biomarcadores da ausência do efeito, posto que mesmo

dosagens muito baixas de Pb induzem genotoxicidade, com alteração do ciclo celular e formação de micronúcleos (Silva et al., 2017).

O primeiro estudo realizado em espécies possivelmente fitorremediadoras deve envolver também as variáveis biométricas, já que características como crescimento rápido, alta capacidade de acúmulo de biomassa e tolerância a contaminantes são importantes e desejadas a espécies remediadoras (Barroso, 2021). Sobre *H. impetiginosus*, tais variáveis não diferiram estatisticamente do grupo Controle, notavelmente, com destaque para o IT e de IQD, que avaliam, respectivamente, a capacidade de planta tolerar o poluente e a qualidade das mudas vegetais produzidas ($p > 0,05$) (Tabela 2).

Tabela 2: Variáveis biométricas de crescimento da plântula de *H. impetiginosus* em diferentes doses de Pb.

Variáveis	Controle	T72	T180	T300	T900	p-valor	R ²	Teste
	(Média ± dp)							
EM (%)	19,04 ± 23,44	23,80 ± 28,78	17,45 ± 18,38	20,63 ± 27,49	45,23 ± 31,94	6,35e-07	0,112	Linear Regression
NF	7,38 ± 1,64	6,66 ± 1,02	6,88 ± 1,23A	6,94 ± 1,34	6,33 ± 1,02	0,28	-	Kruskal-Wallis
AA (cm)	10,47 ± 1,94	10,34 ± 1,49	10,75 ± 1,65	10,09 ± 1,35	10,31 ± 0,95	0,769	-	Anova
CR (cm)	14,2 ± 4,14	14,62 ± 2,71	13,04 ± 2,59	13,18 ± 3,1	13,65 ± 1,66	0,2753	-	Kruskal-Wallis
DC (mm)	2,35 ± 0,3	2,38 ± 0,22	2,32 ± 0,29	2,33 ± 0,29	2,38 ± 0,26	0,756	-	Anova
AF (cm ²)	55,68 ± 27,39	52,52 ± 18,33	56,81 ± 19,1	52,49 ± 22,81	62,35 ± 17,1	0,627	-	Anova
MSA (g)	0,62 ± 0,21	0,61 ± 0,16	0,63 ± 0,11	0,61 ± 0,14	0,61 ± 0,1	0,9556	-	Kruskal-Wallis
MSR (g)	0,19 ± 0,1	0,21 ± 0,08	0,18 ± 0,08	0,23 ± 0,08	0,20 ± 0,067	0,772	-	Anova
MST (g)	0,81 ± 0,28	0,83 ± 0,22	0,82 ± 0,17	0,84 ± 0,19	0,81 ± 0,12	0,9	1,61e-4	Linear Regression
IQD	0,10 ± 0,04	0,11 ± 0,03	0,09 ± 0,03	0,12 ± 0,03	0,10 ± 0,02	0,408	-	Anova
IT	1 ± 0,35	1,02 ± 0,27	1 ± 0,21	1,03 ± 0,23	1 ± 0,15	0,94	-	Kruskal-Wallis

Em: Emergência (%); NF: N° de folhas; AA: Altura aérea (cm); CR: Comprimento radicular (cm); DC: Diâmetro do caule (mm); AF: Área foliar (cm²); MSA: Massa seca aérea (g); MSR: Massa seca radicular (g); MST: Massa seca total (g); IQD: Índice de Qualidade de Dickson; IT: Índice de Tolerância. Letras diferentes indicam tratamentos onde houve diferença significativa a 5% de significância.

A MST é o principal parâmetro de crescimento da planta. Com o propósito de compreender o efeito da dosagem nesta variável, foi construída uma regressão linear simples (Figura 3B).

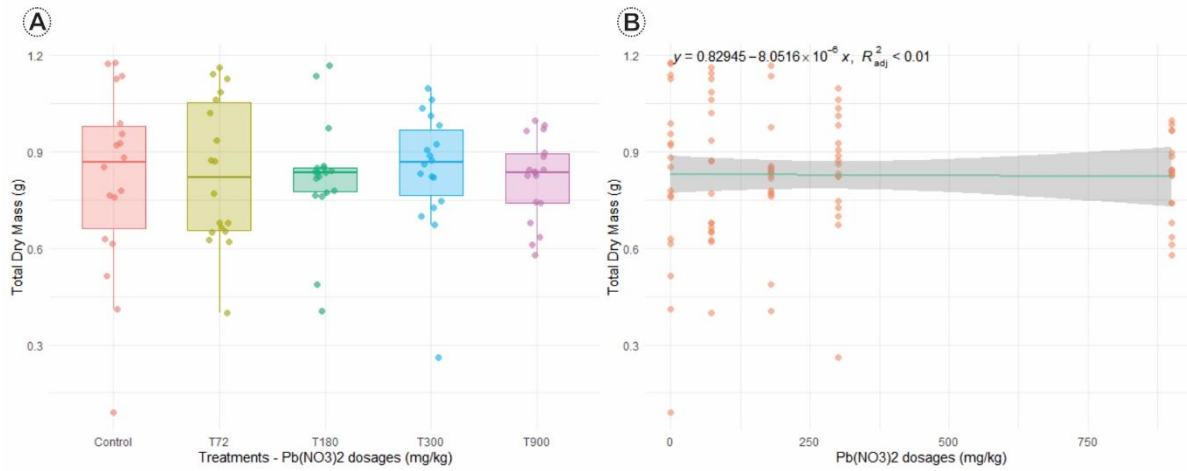


Figura 3: Boxplot descritivo da MST por tratamento (A) e regressão linear simples da variação da MST em função do aumento da dosagem de $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ (B).

O modelo ajustado não forneceu significância estatística global, conforme indicado pelo teste ($F = 0,01417$) e ($p = 0,9055$), evidenciando um poder explicativo quase nulo. O coeficiente de determinação ($R^2 = 1,61e^{-04}$) assinala que somente 0,0161% da variação observada na MST é explicada pela dosagem de Pb. O intercepto estimado (0,8294) representa o valor médio esperado de MST quando o valor a dosagem for zero ($p < 2e^{-16}$). O coeficiente associado à variável preditora ($-8,052e^{-06}$) sugere uma variação negativa muito baixa na variável resposta com o aumento da dosagem de Ni, contudo sem significância estatística ($p = 0,906$).

Sintomas de intoxicação

Pb favorece o desenvolvimento de clorose, necrose e epinastia, uma vez que restringe a absorção de nutrientes e atividade fotossintética (Gupta et al., 2024, Kopptike et al., 2007). Nesta investigação, porém, os sintomas de toxicidade foram bem distribuídos entre os tratamentos (Figura 4B), com a maior parte dos indivíduos possuindo clorose internerval leve (Figura 4D) e, em menor número, lâmina foliar modificada (Figura 4E). Não obstante, o tratamento Controle não apresentou nem necrose nem atrofia, que podem ser observados em (Figura 4F) e (Figura 4C), respectivamente.



Figura 4: Visão panorâmica das mudas em diferentes tratamentos (A); Análise descritiva (%) dos sintomas por tratamento (B); Sintomas de intoxicação atrofia (C), Clorose internerval (D), Lâmina foliar modificada (E) e Necrose (F).

Outro ponto relevante é que, ao longo do experimento, duas amostras do tratamento T180, que emergiram, morreram antes da amostragem. Para além, notou-se que algumas outras unidades amostrais não emergiram completamente, com algum grau de germinação, enraizamento e até expansão dos cotilédones que sustentou a plântula até consumo de suas reservas.

Estes resultados são particularmente interessantes, uma vez que Pb é descrito um forte redutor da atividade fotossintética, da biomassa, do conteúdo de pigmentos e de proteínas em

função da geração de espécies reativas de oxigênio, da peroxidação lipídica e da inativação enzimática (Zulfiqar et al., 2019; (Ghouri et al., 2024).

A ausência de sintomas claros de intoxicação e de impacto no índice de tolerância, de forma dose-dependente para *H. impetiginosus*, está de acordo com o relatado por Meyer et al (2016) que avaliaram o crescimento de plântulas desta espécie durante 90 dias em solos industriais altamente contaminados por diversos metais (Cd, Zn, Pb e Cu). Em condições próximas, Marques, Moreira e Siqueira (2000) também observaram o crescimento da espécie em solos de origem industrial, acumulando Cd e Pb no sistema radicular, sem sofrer impacto na sua massa seca aérea.

Isoladamente, contudo, doses de Zn entre (0,15 e 0,46 mM) afetam fortemente o crescimento de plântulas de *H. impetiginosus*, induzindo o surgimento de efeitos deletérios (clorose, necrose, atrofia, abscisão) e desenvolvimentos de nódulos nas raízes (Gai, Santos e Vieira., 2017), o que não foi observado aqui. Comportamento deletério também já foi descrito em espécie do mesmo gênero, *Handroanthus heptaphyllus*, crescendo em solos contaminados por Cu (0,032, 0,064, 0,096 e 0,128 mM), sem apontar diferenças significativa no incremento da parte aérea, massa seca da parte aérea e da raiz, porém com redução evidente no número de folhas, na área foliar e no incremento radicular (Kuinctner et al., 2023). Apesar disso, a adição de solução nutritiva favorece o crescimento de *H. impetiginosus* em áreas ricas em metais potencialmente tóxicos (Al, Cr, Cd, Pb) (Scarpa et al., 2022).

As plantas desenvolveram diferentes aparatos com o propósito de lidar com o estresse causado por metais. A resistência ou tolerância se manifesta por meio de mecanismos extracelulares que limitam a sua absorção nas células vegetais, comumente chamado de mecanismo de exclusão, e mecanismos intracelulares que os complexa, sequestrando-os nos

vacúolos e os exsudando para fora das células, como forma de desintoxicação (Tang et al., 2023).

Para o Pb, nem todos os métodos de absorção, localização e tolerância das plantas estão esclarecidos. Pb é absorvido por difusão passiva, transporte facilitado e ativo (Gupta et al., 2024). Proteínas transmembranas, como aquaporinas e canais iônicos, facilitam a absorção de Pb pela raiz e sua translocação a outros tecidos (Kulbacka et al., 2017; Ilyas et al., 2023), enquanto que o transporte ativo tem sido associada a transportadores de metais pesados pertencentes às famílias ATPases (Williams; Mills., 2005) e Natural Resistance-Associated Macrophage Protein (NRAMP), que transportam íons Pb contra o gradiente de concentração, nas células do sistema radicular (Chang et al., 2022, Yang et al., 2022 ;Mani; Sankaranarayanan., 2022).

A cerca da tolerância, o dano oxidativo é minimizado por meio da modulação da atividade antioxidante (2ª linha de defesa) de enzimas como SOD, CAT, APX (Gupta et al., 2024; Peco et al., 2020), bem como síntese e complexação de fitoquelatinas (PC), proteínas de baixa massa molecular, que complexam os metais tóxicos (Maestri et al. 2010; Ur Rahman et al., 2024) e Metalotioneínas (MTs) removendo-os de locais sensíveis (Emamverdian et al., 2015).

Quantificação de chumbo nos tecidos, FBC e FT

A quantificação de metal nos tecidos indicou maiores teores (%) de Pb (mg kg^{-1}) nas raízes, com uma menor quantidade translocada à parte aérea (Figura 5A) em todos os tratamentos, com diferença significativa entre os tecidos dentro de cada nível experimental (Figura 5B). O FBC reduziu à medida em que foi aumentada a dosagem, com o menor valor

para o tratamento de maior concentração (Figura 5C). Uma redução similar foi observada no FT, atingindo menor valor na maior dosagem (Figura 5D).

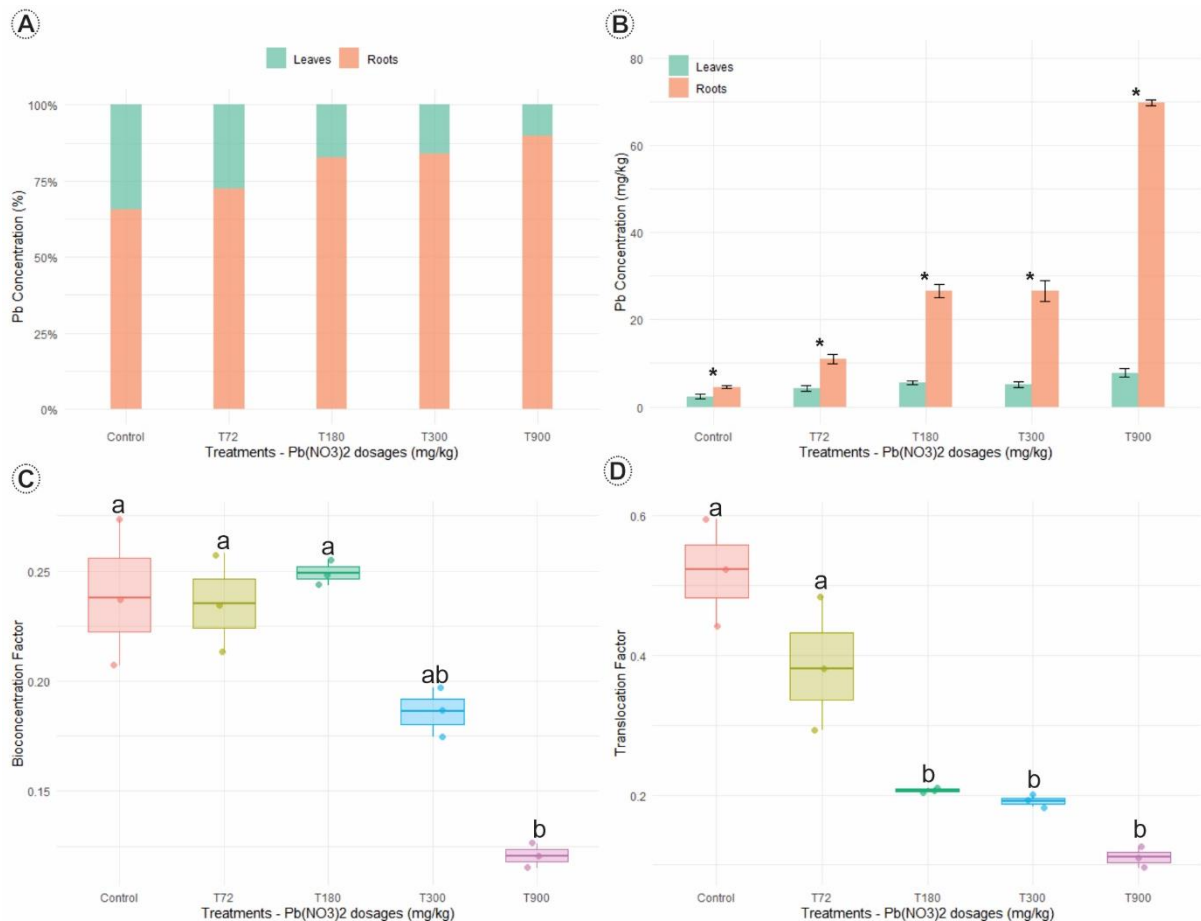


Figura 5: Teor (%) de Pb nos tecidos (A); Concentração (mg/kg) de Pb nas folhas e raízes (B); Fatores de bioacumulação (C) e de translocação (D). Letras diferentes representam tratamentos que diferiram estatisticamente a (5%) de significância.

As médias das quantidades de metais nos tecidos e das métricas de bioacumulação e translocação são indicadas respectivamente (Tabela 3 e 4).

Tabela 3. Valores médios do teor de Pb (mg/kg) nas folhas e nas raízes de *H. impetiginosus*.

Tratamentos	Folhas Pb (mg/kg)	Raízes Pb (mg/kg)	p-valor	Teste
Controle	2,35 ± 0,5	4,5 ± 0,3	0,005	Student's test
T72	4,15 ± 0,65	10,9 ± 1,02	0,001	
T180	5,5 ± 0,4	26,6 ± 1,5	0,0008	
T300	5,08 ± 0,67	26,5 ± 2,4	0,002	
T900	7,72 ± 0,97	69,7 ± 0,68	4,09e-01	

Todos os tratamentos possuem uma quantidade significativamente maior de metal nas raízes a (5%) de significância.

Tabela 4: Média dos valores de bioacumulação e de translocação para todos os tratamentos

Variáveis	Controle	T72	T180	T300	T900	p-valor	Teste
	(Média ± dp)						
BCF	0,23 ± 0,033	0,23 ± 0,022	0,24 ± 0,005	0,18 ± 0,11	0,12 ± 0,005	4,29e-05	Anova
TF	0,51 ± 0,076	0,38 ± 0,096	0,20 ± 0,003	0,19 ± 0,008	0,11 ± 0,015	2,54e-05	

Média dos valores de bioacumulação e de translocação a (5%) de significância.

Aqui, como em outros estudos mencionados anteriormente (Meyer et al., 2016; Siqueira, 2000; Scarpa., 2022), *H. impetiginosus* mostrou-se capaz de excluir o Pb, concentrando-o no sistema radicular, distintamente, no tratamento de maior concentração (69,7 mg kg⁻¹). Isso é explicado tanto pelo contato direto deste órgão com o poluente, quanto como um mecanismo de defesa que protege os tecidos fotossintéticos da superexposição aos metais potencialmente tóxicos. Na rizosfera, os metais podem ser complexados pelos exsudatos da raiz, tornando-se menos biodisponíveis e evitando sua migração aos órgãos mais sensíveis como as folhas (Kuinchtner et al., 2023).

A capacidade da planta em acumular tais metais nos tecidos é avaliada pelo Fator de Bioconcentração (BCF) (Khan et al., 2022). Valores inferiores a 1 indicam uma espécie não acumuladora, já valores superiores confirmam a capacidade de acumulação (Moreno-Rubio et al., 2022). Os valores de bioacumulação *H. impetiginosus* são baixos, e diminuem significativamente a partir da concentração T180, indicando uma capacidade de absorção e bioacumulo limitada em doses maiores de contaminante.

O Fator de Translocação (FT), por outro lado, designa a capacidade da planta de translocar o metal de suas raízes à parte aérea e seu valor é usado para determinar a adequação da planta à fitoextração de um determinado metal (Khan et al., 2022). Valores maiores que 1 indicam uma espécie competente à fitoextração, ao passo que valores menores indicam baixa atividade de translocação de contaminantes. Este transporte dos metais tóxicos das raízes aos

brotos, onde sofrem sequestro vacuolar, é considerada uma via de desintoxicação importante dos hiperacumuladores (Tang, 2022). Para *H. impetiginosus*, os valores de translocação são pequenos e diminuem com o aumento da dosagem, inviabilizando seu uso à fitoextração, todavia qualificando-a à fitoestabilização.

Anatomia e histoquímica das raízes e folhas

O azul de toluidina é capaz de marcar, nas células vegetais, carboidratos estruturais, celulose, hemicelulose, pectina e amido. A respeito da região mediana da raiz, os tratamentos Controle (Figura 6A), T72 (Figura 6B), T180 (Figura 6C) e T900 (Figura 6E) não exibiram alterações anatômicas visíveis, através desta técnica utilizada.

As células de *H. impetiginosus* possuem formato ovoide com grãos de amidos bem destacados na região do córtex (Figura 6E) e do cilindro vascular, com (2-3) camadas de fibras (Figura 6A) associadas a monocristais prismáticos de oxalato de cálcio. A epiderme é composta por camadas de (2-3) células (Figura 6E). Diferentemente dos demais tratamentos, o T300 possui um córtex com células mais externas colapsadas, achatadas, e maior quantidade de células na epiderme (4-6), fibras adensadas e ausência de grânulos de amido (Figura 6D).

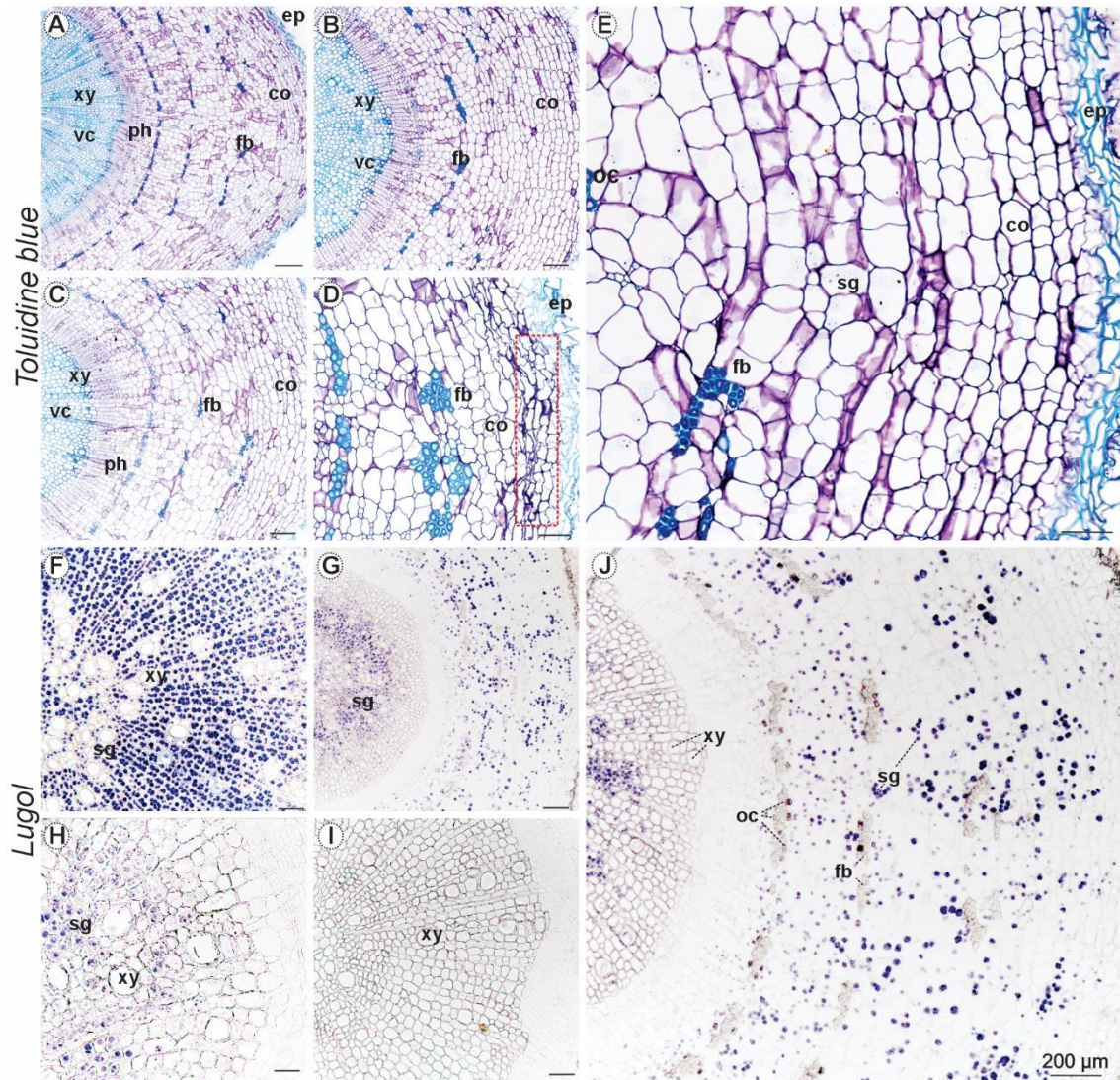


Figura 6: Análise anatômica das estruturas celulares por azul de toluidina (A-E) e histoquímica da deposição de amido usando lugol (F-J) na região mediana da zona de alongamento das raízes de *H. impetiginosus* submetidas a diferentes dosagens de Pb. Tratamentos Controle (A e F); T72 (B e G); T180 (C e H); T300 (D e I) e T900 (E e J). As estruturas são identificadas por Xy: Xilema; VC: Cilindro vascular; Ph: Floema; Fb: Fibras; Co: Córtex; Ep: Epiderme e SG: Grânulos de amido.

Para investigar a aparente diferença na deposição de amido, utilizou-se o reagente *Lugol*. Por esta técnica, o tratamento T300 não exibiu grânulos de amidos visíveis (Figura 6I), enquanto que os demais mostraram deposição intensa na região medular do cilindro vascular, excetuando-se as células do xilema poliárquico (Figura 6I) e a zona meristemática entre o cilindro vascular e o córtex da raiz (Figura 6G). O grupo Controle mostrou uma deposição mais

intensa de amido tanto na região medular do câmbio (Figura 6F), quanto no colênquima cortical, que não foi tão marcado conforme (Figura 6H) (Figura 6).

A epiderme de *H. impetiginosus* é unisseriada em ambas as faces, abaxial e adaxial. Seu mesófilo é dorsiventral com parênquima paliçádico marcado pelo adensamento de células cilíndricas verticais do lado adaxial. O parênquima esponjoso, por sua vez, tem (2-4) camadas de células ovoides com muitos espaços intercelulares do lado abaxial. O feixe vascular, posicionado centralmente, é cercado por fibras esclerenquimáticas (Figura 7D).

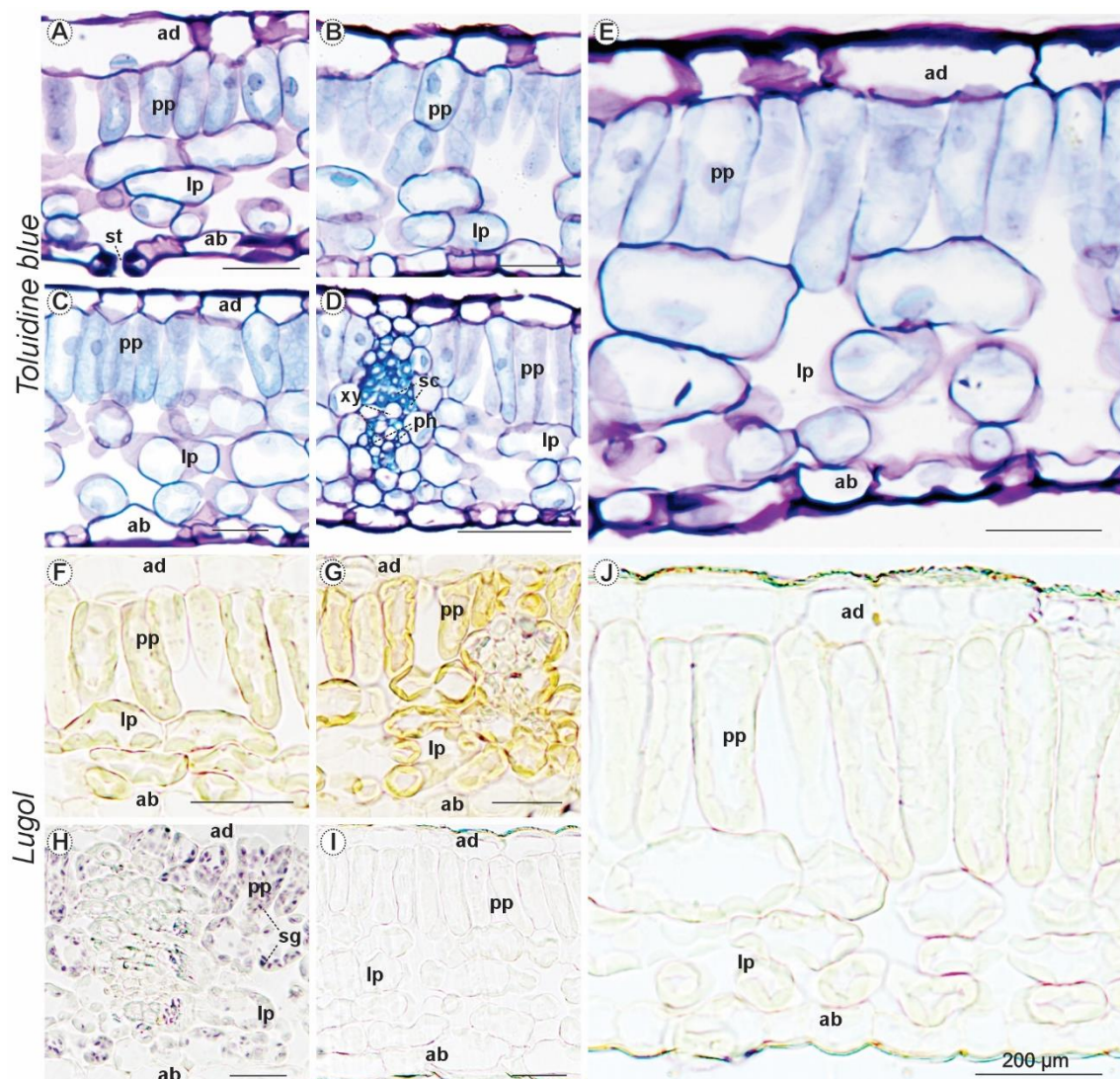


Figura 7: Análise anatômica das estruturas celulares por azul de toluidina (A-E) e histoquímica da deposição de amido usando lugol (F-J) no limbo foliar de plântulas de *H. impetiginosus* submetidas a diferentes dosagens de Pb. Tratamentos Controle (A e F); T72 (B e G); T180 (C e H); T300 (D e I) e T900 (E e J). As estruturas são

identificadas por AD: Epiderme adaxial; AB: Epiderme abaxial; PP: Parênquima Paliçádico; LP: Parênquima Lacunoso; ST: Estômato; Xy: Xilema; Ph: Floema; Sc: Esclerênquima. e Sg: Grânulos de amido.

Para a análise descritiva, não foram perceptíveis alterações anatômicas expressivas das estruturas foliares. No geral, o grupo Controle revelou um parênquima paliçádico visualmente menos denso e células menos desenvolvidas (Figura 7A), ao passo que o parênquima lacunoso, de células ovoides levemente alongadas horizontalmente, demonstra maior quantidade de espaços intercelulares, quando comparado aos demais tratamentos (Figura 7B-E). O lugol marcou a deposição de amido meramente no limbo do grupo Controle (Figura 7F) e, em maior intensidade, no tratamento T180 (Figura 7H), compatível com atividade fotossintética do tecido.

Sobre a deposição de lipídeos, *Sudan Black* identificou uma leve camada de cutícula sobre a epiderme das folhas e mais visivelmente em ambas faces da região da nervura central. Na raiz, a epiderme multisseriada foi levemente destacada. Visando proteínas, *Xylidine ponceau* marcou a deposição de proteínas nas células do parênquima do mesófilo de todos os tratamentos. Como nenhuma diferença significativa foi visível, as imagens não foram destacadas.

As alterações estruturais em folhas e raízes expostas a contaminantes nem sempre seguem uma relação dose-dependente, sendo influenciadas pela forma de contaminação, fase e condições de desenvolvimento. Em *Albizia lebbbeck*, doses de 75 mmol L⁻¹ Pb(NO₃)₂ reduzem a espessura da nervura central, a espessura e a área das células das superfícies abaxiais e adaxiais, além da área estomática. Já 25 mmol L⁻¹ favorecem o espessamento da nervura central, da lâmina foliar e aumentam a densidade estomática abaxial. Nas raízes, a dose mais alta reduz a área do córtex (47,8%), do metaxilema (60,5%) e do floema (55,9%) (Naveed et al., 2023).

Em *A. halimus*, o Pb correlaciona-se positivamente com a densidade estomática, espessura da epiderme adaxial e da folha, entretanto negativamente com a espessura do

mesófilo. Em *N. retusa*, a correlação é positiva para epiderme abaxial e densidade estomática (Krir et al., 2025). As folhas de *S. pyramidalis* e *G. celosioides*, que crescem em solos contaminados por Pb, apresentam maior desenvolvimento de tricomas, células parenquimáticas colapsadas no córtex e espessamento epidérmico. Já as raízes mostram aumento dos feixes vasculares e espessamento epidérmico.

Doses acima de $1,5 \text{ umol L}^{-1}$ reduzem a espessura epidérmica da porção adaxial de *E. grandiflorus*, enquanto que a abaxial é reduzida proporcionalmente com o aumento da dosagem de $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$. Pb também reduz a espessura do parênquima paliçádico e esponjoso, mas aumenta o diâmetro dos vasos do xilema (Ribeiro et al., 2024). Doses crescentes de Pb ($0\text{-}1 \text{ mmol L}^{-1}$) também induzem um aumento da epiderme, do clorênquima, na medida que que reduzem o colênquima e o percentual de feixes vasculares em *Schinus molle* (Ribeiro et al., 2019). Pb também se mostra capaz de aumentar a espessura do mesófilo, da epiderme adaxial, reduzir o número e aumentar o diâmetro dos elementos de vaso e do floema em *Astronium graveolens* (Araújo et al., 2020).

Na halófito *A. halimus*, o Pb correlaciona-se positivamente com a densidade estomática, espessura da epiderme adaxial e folha, mas negativamente para espessura do mesófilo, enquanto que em *N. retusa* a correlação é positiva para epiderme abaxial e densidade estomática (Krir et al., 2025). Em *T. ciliata*, a análise de microscopia eletrônica de varredura indica que a toxicidade por Pb e Cd destroi as células epidérmicas e corticais reduzindo a área da raiz. O xilema, inclusive, revela espaços intercelulares aumentados, assim como uma redução do feixe vascular das raízes (Kaur et al., 2024). O Pb precipita-se extracelularmente e liga-se aos locais de troca iônica nas paredes celulares. Tal acúmulo causa um aumento do meristema apical adjacente à coifa da raiz, induzindo o espessamento da parede celular e a um aumento no tamanho do vacúolo (Rucińska-Sobkowiak et al., 2013).

Outros metais também induzem o surgimento de toxicidade nos tecidos vegetais. Cd desordena as células do ápice da raiz, além de deformar as células da epiderme e as camadas corticais mais externas, acelerando seu crescimento, sem promoção do alongamento (Rascio et al., 2008). O Cd também é capaz de reduzir diâmetro da raiz, desintegrar a epiderme e as células corticais mais externas (Gratão et al., 2009). Já o Boro afeta as folhas de *A. fraxinifolium*, induzindo um aumento na espessura da epiderme adaxial, no parênquima paliçádico, enquanto que na raiz aumenta a espessura do floema, o diâmetro dos elementos de vaso e sua redução em quantidade (Leite et al., 2022).

A respeito do Pb, os tratamentos incubados apenas com água não reagiram com a ditizona nas folhas (Figura 8A) e raízes laterais (Figura 8B). Por outro lado, as plantas incubadas em $Pb(NO_3)_{2(aq)}$ mostraram intensa deposição nos tecidos das folhas e das raízes. Nas folhas, ditizona corou intensamente as células vasculares e as fibras esclerenquimáticas (Figura 8C), enquanto que, nas raízes, houve tanto deposição no córtex das raízes laterais (Figura 8D), quanto nos elementos de vaso do xilema e na endoderme (Figura 8E).

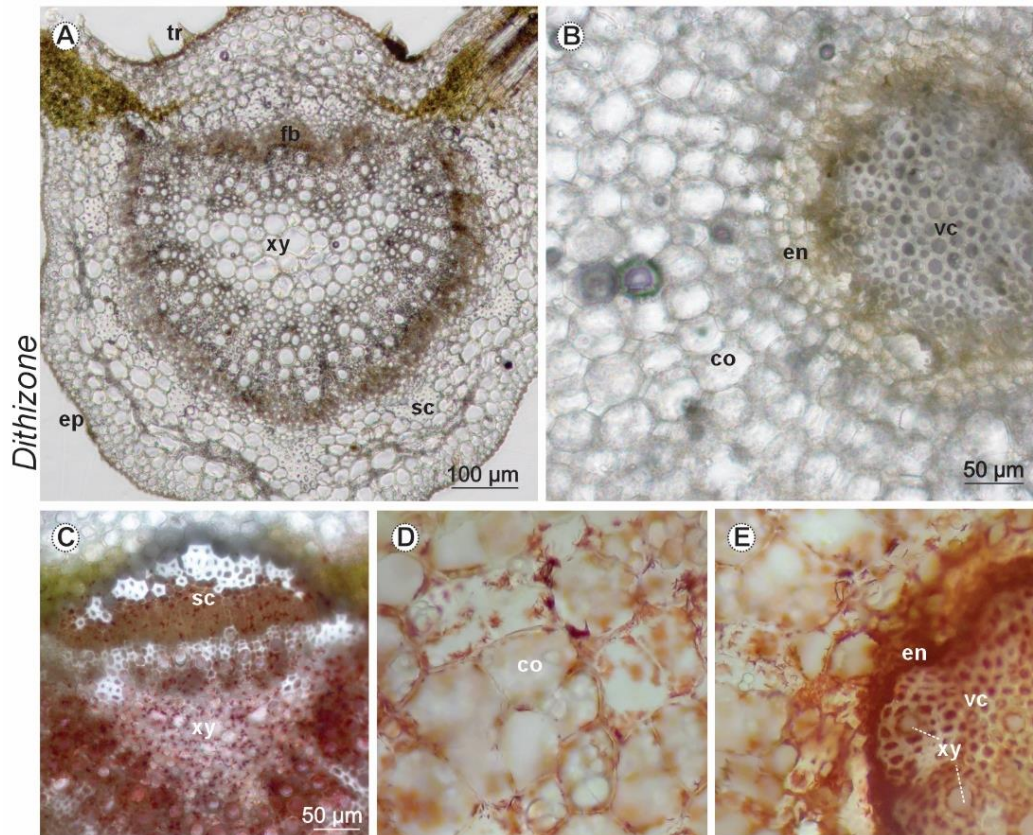


Figura 8. Análise an histoquímica da deposição de amido usando ditizona em folhas e raízes de plântulas de *H. impetiginosus* incubadas em 0 e 5 mmol L⁻¹ de Pb(NO₃)_{2(aq)}. Folha e Raíz Controle (A e B); Folha incubada (5 mM) (C); Córtex e cilindro vascular de raízes laterais incubada (5 mM) (D e E).

A ausência de Pb no tecido fotossintético de *H. impetiginosus* pode indicar um mecanismo de defesa da planta à degradação dos fotossistemas. Resultado similar de deposição foi descrito para *Iris lactea* aplicando-se a sonda leadmiumTM Green (Yuan et al., 2015).

Pela mesma técnica de ditizona, Pb é visivelmente identificado no feixe vascular de *A. maritima* (Wierzbicka et al., 2024), na endoderme de *Anthllis vulneraria* (Sujkowska-Rybkowska et al., 2023), na endoderme, periciclo e mesófilo de capim-limão (Pandey et al., 2020), na área da bainha do feixe e em suas células, além da parede celular em folhas de *Zea mays* (Nazięblo; Merlak; Wierzbicka, 2023).

Por outro lado, em *B. auriculata*, Pb não é encontrado nos feixes vasculares e seu acúmulo nas paredes e no vacúolo das células do córtex da raiz são associados à expressão de

fitoquelatinas, como *PC2*, capazes de se ligarem ao metal e transportá-lo ao vacúolo (Peco et al., 2020). Acredita-se também que este metal é transportado ao estelo em função da presença dos grupos -OH livres que podem estar relacionados ao seu sequestro na parede celular em *Salix integra* (Wang et al., 2021).

Considerações sobre o experimento

O sucesso da fitorremediação depende da identificação de espécies de plantas nativas adequadas com alta biomassa para lidar com a contaminação por metais (Chandrasekhar; Ray, 2019). O ideal é identificar espécies hiperacumuladoras ou de crescimento rápido, capazes de mobilizar uma grande quantidade de poluentes em seus tecidos.

Neste estudo, a tolerância da espécie lenhosa *H. impetiginosus* ao Pb foi investigada. Para a fitorremediação, as espécies lenhosas têm algumas vantagens, como a alta produção de biomassa, um sistema radicular profundo e a capacidade de crescer em solos pobres em nutrientes (Zeng et al., 2021). Esse é o caso do *H. impetiginosus*, que é amplamente distribuído pelos biomas brasileiros e é comumente utilizado em projetos de restauração, afora o fato de ter produção abundante de sementes (Gai; Santos; Vieira, 2017) e apelo paisagístico.

Os resultados expostos são interessantes porque indicam uma tolerância de *H. impetiginosus* na emergência, bem como na sobrevivência nos estágios iniciais, podendo ser empregado sob forma de plantio direto, reduzindo os custos que estariam associados à produção e transplante de mudas. Tal resistência é um forte indício do potencial de *H. impetiginosus* não isoladamente como fitorremediador, mas também como uma espécie resiliente capaz de resistir a acidentes ambientais ou à pressão antrópica de deposição de metais no solo.

Algumas ponderações, entretanto, são necessárias. Neste estudo, a resposta antioxidante do *H. impetiginosus* ao Pb não foi avaliada, embora a ausência de efeitos sobre o crescimento possa indicar um mecanismo de defesa eficiente contra esse metal.

Como fonte de contaminante, foi escolhido um sal solúvel de Pb. O nitrato sabidamente favorece o crescimento das plantas, e *H. impetiginosus* tem rendimento ótimo em dosagem de 240 mg dm⁻³ (Leite et al., 2017), o que pode ter minimizado os efeitos tóxicos do metal e favorecido a emergência na maior dosagem. No entanto, o modelo de regressão obtido para a emergência explica apenas 10% da variação observada, ao passo que a massa seca não mostrou alteração significativa. Além disso, o uso de qualquer outro sal também poderia influenciar o crescimento das mudas, sendo o nitrato escolhido por não afetá-lo desfavoravelmente (Chandrasekhar; Ray, 2019). Afora isso, a fertilização do substrato é uma estratégia comumente usada para aumentar a produtividade da biomassa em estudos de estresse e fitorremediação.

Outro ponto é que não existe consenso, na literatura, em relação ao método de aplicação do contaminante. Aqui, foi usado um substrato contaminado nas dosagens de referência do CONAMA, todavia, muitos outros estudos preferem trabalhar em solos naturais, substratos inertes ou hidroponia, o que gera comparações assimétricas. Os valores mencionados foram ajustados para mmol L⁻¹, a fim de facilitar a compreensão entre as comparações realizadas.

CONCLUSÃO

H. impetiginosus germina e emerge em altas doses de Pb, acumulando-o sobretudo no sistema radicular sem apresentar efeitos deletérios graves nos estágios iniciais de vida. Alterações anatômicas e histoquímicas consideráveis foram exclusivamente perceptíveis no tratamento T300, com o colapso da região periférica do córtex e ausência de deposição do

amido. A ditizona também revelou uma majoritária deposição de Pb na região do cilindro vascular e, em menor grau, no córtex das raízes, ao passo que, para as folhas, o metal aparece restrito próximo à bainha do feixe, sem afetar a região clorofiliana do mesófilo. Estes resultados evidenciam a *H. impetiginosus* como espécie fitoestabilizadora, além de sua resiliência a ambientes contaminados por Pb, podendo ser utilizada para restauração de áreas contaminadas.

REFERÊNCIAS

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2022). Priority list of hazardous substances. U.S. Department of Health and Human Services. <https://www.atsdr.cdc.gov/programs/substance-priority-list.html>

Alaboudi, K. A., Ahmed, B., & Brodie, G. (2018). Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (*helianthus annuus*) plant. *Annals of Agricultural Sciences*, 63(1), 123–127. <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2018.05.007>

Almeida, D. D. M., Silva, B. R. F., Ucella Filho, J. G. M., Sousa, A. N., Costa, T. L. N., & Santana, J. A. D. S. (2020). Efeito de diferentes substratos no desenvolvimento inicial de mudas de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. Ex DC). *Brazilian Journal of Development*, 6(5), 24619–24631. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n5-060>

Araujo, M. A., Leite, M. C. M., Camargos, L. S., & Martins, A. R. (2020). Tolerance evaluation and morphophysiological responses of *Astronium graveolens*, a native brazilian Cerrado, to addition of lead in soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 195, 110524. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110524>

Barroso, G. M., Ferreira, M. G., Dos Santos, E. A., Ferreira, E. A., Titon, M., Xavier, P. V. S., Francino, D. M. T., & Santos, J. B. D. (2022). *Mabea fistulifera* and *zeyheria tuberculosa* can be indicated for phytoremediation programs of soils contaminated with hormonal herbicides. *International Journal of Phytoremediation*, 24(9), 987–994. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1991267>

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. (2009). Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009. <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2017/09/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-acs.pdf>

Chandrasekhar, C., & Ray, J. G. (2019). Lead accumulation, growth responses and biochemical changes of three plant species exposed to soil amended with different concentrations of lead

nitrate. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 171, 26–36.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.058>

Chang, J.-D., Gao, W., Wang, P., & Zhao, F.-J. (2022). Osnramp5 is a major transporter for lead uptake in rice. *Environmental Science & Technology*, 56(23), 17481–17490.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.2c06384>

Das, A., Das Choudhury, S., Das, A. K., Samal, A., & Awada, T. (2023). EmergeNet: A novel deep-learning based ensemble segmentation model for emergence timing detection of coleoptile. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1084778>

Dickson, A., Leaf, A. L., & Hosner, J. F. (1960). Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *The Forestry Chronicle*, 36(1), 10–13.
<https://doi.org/10.5558/tfc36010-1>

Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdorani, F., & Xie, Y. (2015). Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response. *The Scientific World Journal*, 2015(1), 756120.
<https://doi.org/10.1155/2015/756120>

Gai, A. P. C., dos Santos, D. S., & Vieira, E. A. (2017). Effects of zinc excess on antioxidant metabolism, mineral content and initial growth of *Handroanthus impetiginosus* (Mart. Ex DC.) Mattos and *Tabebuia roseoalba* (Ridl.) Sandwith. *Environmental and Experimental Botany*, 144, 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.09.006>

Ghouri, F., Sarwar, S., Sun, L., Riaz, M., Haider, F. U., Ashraf, H., Lai, M., Imran, M., Liu, J., Ali, S., Liu, X., & Shahid, M. Q. (2024). Silicon and iron nanoparticles protect rice against lead (Pb) stress by improving oxidative tolerance and minimizing Pb uptake. *Scientific Reports*, 14(1), 5986. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55810-2>

Gratão, P. L., Monteiro, C. C., Rossi, M. L., Martinelli, A. P., Peres, L. E. P., Medici, L. O., Lea, P. J., & Azevedo, R. A. (2009). Differential ultrastructural changes in tomato hormonal mutants exposed to cadmium. *Environmental and Experimental Botany*, 67(2), 387–394.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.017>

Gupta, M., Dwivedi, V., Kumar, S., Patel, A., Niazi, P., & Yadav, V. K. (2024). Lead toxicity in plants: Mechanistic insights into toxicity, physiological responses of plants and mitigation strategies. *Plant Signaling & Behavior*, 19(1), 2365576.
<https://doi.org/10.1080/15592324.2024.2365576>

Ilyas, M. Z., Sa, K. J., Ali, M. W., & Lee, J. K. (2023). Toxic effects of lead on plants: Integrating multi-omics with bioinformatics to develop Pb-tolerant crops. *Planta*, 259(1), 18.
<https://doi.org/10.1007/s00425-023-04296-9>

Johansen, D. (1940). *Plant microtechnique*. McGraw-Hill Book Company, Inc.
<https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.271824/page/n7/mode/2up>

Karnovsky, M. J. (1965). A formaldehyde-glutaraldehyde fixative of high osmolality for use in electron microscopy. *Journal of Cell Biology*, 27(2).
<https://www.researchgate.net/publication/244955881>

Kaur, R., Sharma, R., Chandel, S., Thakur, S., & Chauhan, S. K. (2024). Exploring the phytoremediation potential of *Toona ciliata* grown on lead and cadmium contaminated soils through morphological and anatomical analysis. *Acta Physiologiae Plantarum*, 47(1), 2.
<https://doi.org/10.1007/s11738-024-03745-6>

Kopittke, P. M., Asher, C. J., Kopittke, R. A., & Menzies, N. W. (2007). Toxic effects of Pb²⁺ on growth of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Environmental Pollution*, 150(2), 280–287.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.01.011>

Krir, N., Guedri, M. M., Romdhane, M., & Alshaqha, M. A. (2025). Anatomical adaptations of halophyte leaves (*Nitraria retusa* [forsskal] asch. And *atriplex halimus* l.) in response to cement dust pollution in arid environments. *Life*, 15(1), 61. <https://doi.org/10.3390/life15010061>

Kuinchtner, C. C., Aguilar, M. V. M., Senhor, D. F., Birck, T. P., Brunetto, G., & Tabaldi, L. A. (2023). Morpho-physiological and biochemical mechanisms of copper tolerance in *Handroanthus heptaphyllus*. *Ciência e Agrotecnologia*, 47, e011322.
<https://doi.org/10.1590/1413-7054202347011322>

Kulbacka, J., Choromańska, A., Rossowska, J., Weźgowiec, J., Saczko, J., & Rols, M.-P. (2017). Cell membrane transport mechanisms: Ion channels and electrical properties of cell membranes. Em J. Kulbacka & S. Satkauskas (Orgs.), *Transport Across Natural and Modified Biological Membranes and its Implications in Physiology and Therapy* (p. 39–58). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56895-9_3

Lamhamdi, M., Bakrim, A., Aarab, A., Lafont, R., & Sayah, F. (2011). Lead phytotoxicity on wheat (*Triticum aestivum* l.) Seed germination and seedlings growth. *Comptes Rendus Biologies*, 334(2), 118–126. <https://doi.org/10.1016/j.crvbi.2010.12.006>

Latif, A., Abbas, A., Iqbal, J., Azeem, M., Asghar, W., Ullah, R., Bilal, M., Arsalan, M., Khan, M., Latif, R., Ehsan, M., Abbas, A., Bashir, S., Bashir, S., Saifullah Khan, K., Sun, K., Kang, W., Bashir, F., & Chen, Z. (2023). Remediation of environmental contaminants through phytotechnology. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(3), 139. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06112-2>

Leite, M. C. M., de Araujo, M. A., da Silva de Paiva, W., Camargos, L. S., & Martins, A. R. (2022). Morphological responses and tolerance of a tree native to the Brazilian Cerrado *Astronium fraxinifolium* Schott to boron toxicity. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(5), 6900–6910. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15710-8>

Maestri, E., Marmioli, M., Visioli, G., & Marmioli, N. (2010). Metal tolerance and hyperaccumulation: Costs and trade-offs between traits and environment. *Environmental and Experimental Botany*, 68(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.10.011>

Mani, A., & Sankaranarayanan, K. (2022). Natural resistance-associated macrophage proteins (Nramps): Functional significance of metal transport in plants. Em K. Kumar & S. Srivastava (Orgs.), *Plant Metal and Metalloid Transporters* (p. 91–107). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6103-8_5

Marques, T. C. L. L. de S. e M., Moreira, F. M. de S., & Siqueira, J. O. (2000). Crescimento e teor de metais de mudas de espécies arbóreas cultivadas em solo contaminado com metais pesados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35, 121–132. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000100015>

Meyer, S. T., Castro, S. R., Fernandes, M. M., Soares, A. C., De Souza Freitas, G. A., & Ribeiro, E. (2016). Heavy-metal-contaminated industrial soil: Uptake assessment in native plant species from Brazilian Cerrado. *International Journal of Phytoremediation*, 18(8), 832–838. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1146224>

Moreno-Rubio, N., Ortega-Villamizar, D., Marimon-Bolívar, W., Bustillo-Lecompte, C., & Tejada-Benítez, L. P. (2022). Potential of *Lemna minor* and *Eichhornia crassipes* for the phytoremediation of water contaminated with Nickel (II). *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1), 119. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10688-3>

Nas, F. S., & Ali, M. (2018). The effect of lead on plants in terms of growing and biochemical parameters: A review. *MOJ Ecology & Environmental Sciences*, 3(4). <https://doi.org/10.15406/mojes.2018.03.00098>

Naveed, M., Ghaffar, M., Khan, Z., Gul, N., Ijaz, I., Bibi, A., Pervaiz, S., Alharby, H. F., Tariq, M. S., Ahmed, S. R., Hakeem, K. R., & Tan, D. K. Y. (2023). Morphological and structural responses of *albizia lebbek* to different lead and nickel stress levels. *Agriculture*, 13(7), 1302. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071302>

Naziębło, A., Merlak, H. M., & Wierzbicka, M. H. (2023). The bundle sheath in *Zea mays* leaves functions as a protective barrier against the toxic effect of lead. *Journal of Plant Physiology*, 290, 154104. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2023.154104>

O'Brien, T. P., Feder, N., & McCully, M. E. (1964). Polychromatic staining of plant cell walls by toluidine blue O. *Protoplasma*, 59(2), 368–373. <https://doi.org/10.1007/BF01248568>

Paiva, É. A. S. (2021). Do calcium oxalate crystals protect against herbivory? *The Science of Nature*, 108(3), 24. <https://doi.org/10.1007/s00114-021-01735-z>

Pandey, J., Sarkar, S., Verma, R. K., & Singh, S. (2020). Sub-cellular localization and quantitative estimation of heavy metals in lemongrass plants grown in multi-metal contaminated tannery sludge. *South African Journal of Botany*, 131, 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.01.034>

Peco, J. D., Higuera, P., Campos, J. A., Olmedilla, A., Romero-Puertas, M. C., & Sandalio, L. M. (2020). Deciphering lead tolerance mechanisms in a population of the plant species *Biscutella auriculata* L. from a mining area: Accumulation strategies and antioxidant defenses. *Chemosphere*, 261, 127721. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127721>

Rascio, N., Dalla Vecchia, F., La Rocca, N., Barbato, R., Pagliano, C., Raviolo, M., Gonnelli, C., & Gabbrielli, R. (2008). Metal accumulation and damage in rice (cv. Vialone nano) seedlings exposed to cadmium. *Environmental and Experimental Botany*, 62(3), 267–278. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.09.002>

Ribeiro, E. S., Pereira, M. P., de Castro, E. M., de Resende Baroni, G., Duarte, V. P., de Pádua, M. P., & Pereira, F. J. (2024). Growth, gas exchange, and leaf anatomy of *Echinodorus grandiflorus* (Cham. & schltr.) Micheli under Pb contamination. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31(28), 41059–41068. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33851-4>

Ribeiro, V. E., Pereira, M. P., de Castro, E. M., Corrêa, F. F., Cardoso, M. das G., & Pereira, F. J. (2019). Enhanced essential oil and leaf anatomy of *Schinus molle* plants under lead contamination. *Industrial Crops and Products*, 132, 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.014>

Rocha, C. S., Rocha, D. C., Kochi, L. Y., Carneiro, D. N. M., dos Reis, M. V., & Gomes, M. P. (2022). Phytoremediation by ornamental plants: A beautiful and ecological alternative. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(3), 3336–3354. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17307-7>

Rucińska-Sobkowiak, R., Nowaczyk, G., Krzesłowska, M., Rabęda, I., & Jurga, S. (2013). Water status and water diffusion transport in lupine roots exposed to lead. *Environmental and Experimental Botany*, 87, 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.09.012>

Scarpa, A. L. M., da Cunha Cruz, Y., Duarte, V. P., de Castro, E. M., Pasqual, M., de Oliveira, J. P. V., & Pereira, F. J. (2022). Growth response, gas exchange, and leaf anatomy of *handroanthus* spp. Seedlings in mine tailings enriched with nutrient solution. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(3), 3774–3787. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00926-5>

Seregin, V. I., & Ivanov, V. B. (1997). Histochemical investigation of cadmium and lead distribution in plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 44(6), 915–921. https://www.researchgate.net/publication/279705125_Histochemical_Investigation_of_Cadmium_and_Lead_Distribution_in_Plants

Sharma, P., Tripathi, S., Purchase, D., & Chandra, R. (2021). Integrating phytoremediation into treatment of pulp and paper industry wastewater: Field observations of native plants for the detoxification of metals and their potential as part of a multidisciplinary strategy. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105547. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105547>

Shi, X., Zhang, X., Chen, G., Chen, Y., Wang, L., & Shan, X. (2011). Seedling growth and metal accumulation of selected woody species in copper and lead/zinc mine tailings. *Journal of Environmental Sciences*, 23(2), 266–274. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60402-0](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60402-0)

Silva, S., Silva, P., Oliveira, H., Gaivão, I., Matos, M., Pinto-Carnide, O., & Santos, C. (2017). Pb low doses induced genotoxicity in *Lactuca sativa* plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 112, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.12.026>

Sujkowska-Rybkowska, M., Lisek, A., Sumorok, B., Derkowska, E., Szymańska, M., & Sas-Paszt, L. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi as an important factor enabling the adaptation of *anthyllis vulneraria* L. To zn-pb-polluted tailings. *Plants*, 12(11), 2092. <https://doi.org/10.3390/plants12112092>

Tang, Z., Wang, H., Chen, J., Chang, J., & Zhao, F. (2023). Molecular mechanisms underlying the toxicity and detoxification of trace metals and metalloids in plants. *Journal of Integrative Plant Biology*, 65(2), 570–593. <https://doi.org/10.1111/jipb.13440>

Teixeira, T. C. et al. *MANUAL DE MÉTODOS DE ANÁLISE DE SOLO*. 3. ed. [S. l.: s. n.], 2017. 573 p. ISBN 978-85-7035-771-7.

Ur Rahman, S., Qin, A., Zain, M., Mushtaq, Z., Mehmood, F., Riaz, L., Naveed, S., Ansari, M. J., Saeed, M., Ahmad, I., & Shehzad, M. (2024). Pb uptake, accumulation, and translocation in plants: Plant physiological, biochemical, and molecular response: A review. *Heliyon*, 10(6), e27724. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27724>

Usman, K., Al Jabri, H., Abu-Dieyeh, M. H., & Alsafran, M. H. S. A. (2020). Comparative assessment of toxic metals bioaccumulation and the mechanisms of chromium (Cr) tolerance and uptake in *calotropis procera*. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00883>

Usman, K., Al-Ghouti, M. A., & Abu-Dieyeh, M. H. (2019). The assessment of cadmium, chromium, copper, and nickel tolerance and bioaccumulation by shrub plant *Tetraena qataranse*. *Scientific Reports*, 9(1), 5658. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42029-9>

Vangronsveld, J., Herzig, R., Weyens, N., Boulet, J., Adriaensen, K., Ruttens, A., Thewys, T., Vassilev, A., Meers, E., Nehnevajova, E., van der Lelie, D., & Mench, M. (2009). Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: Lessons from the field. *Environmental Science and Pollution Research*, 16(7), 765–794. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0213-6>

Vidal, B. de C. (1970). Dichroism in collagen bundles stained with Xylidine-Ponceau 2R. *Annales D'histochimie*, 15(4), 289–296.

Wang, L., Hou, D., Shen, Z., Zhu, J., Jia, X., Ok, Y. S., Tack, F. M. G., & Rinklebe, J. (2020). Field trials of phytomining and phytoremediation: A critical review of influencing factors and effects of additives. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(24), 2724–2774. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1705724>

Wang, S., Shi, X., Salam, M. M. A., & Chen, G. (2021). Integrated study on subcellular localization and chemical speciation of Pb reveals root strategies for Pb sequestration and detoxification in *Salix integra*. *Plant and Soil*, 467(1), 197–211. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05045-1>

Werle, S., Bisorca, D., Katelbach-Woźniak, A., Pogrzeba, M., Krzyżak, J., Ratman-Kłosińska, I., & Burnete, D. (2017). Phytoremediation as an effective method to remove heavy metals from contaminated area – TG/FT-IR analysis results of the gasification of heavy metal contaminated

energy crops. *Journal of the Energy Institute*, 90(3), 408–417.
<https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.04.002>

Wierzbicka, M., Begiedza, M., Bodzon, K., Bemowska-Kałabun, O., Brzost, K., Wróbel, M., Trzybiński, D., & Woźniak, K. (2024). Role of the salt glands of *Armeria maritima* (Halophyte) in removal of lead from tissues. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(25), 37790–37809. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33624-z>

Williams, L. E., & Mills, R. F. (2005). P1B-ATPases – an ancient family of transition metal pumps with diverse functions in plants. *Trends in Plant Science*, 10(10), 491–502. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2005.08.008>

Yahaghi, Z., Shirvani, M., Nourbakhsh, F., & Pueyo, J. J. (2019). Uptake and effects of lead and zinc on alfalfa (*medicago sativa* l.) seed germination and seedling growth: Role of plant growth promoting bacteria. *South African Journal of Botany*, 124, 573–582. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.01.006>

Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M. L., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: A promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>

Yang, Z., Yang, F., Liu, J.-L., Wu, H.-T., Yang, H., Shi, Y., Liu, J., Zhang, Y.-F., Luo, Y.-R., & Chen, K.-M. (2022). Heavy metal transporters: Functional mechanisms, regulation, and application in phytoremediation. *Science of The Total Environment*, 809, 151099. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151099>

Yuan, H., Zhang, Y., Huang, S., Yang, Y., & Gu, C. (2015). Effects of exogenous glutathione and cysteine on growth, lead accumulation, and tolerance of *Iris lactea* var. *Chinensis*. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(4), 2808–2816. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3535-y>

Zeng, P., Guo, Z., Xiao, X., Zhou, H., Gu, J., & Liao, B. (2022). Tolerance capacities of *Broussonetia papyrifera* to heavy metal(Loid)s and its phytoremediation potential of the contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*, 24(6), 580–589. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1958746>

Zulfiqar, U., Farooq, M., Hussain, S., Maqsood, M., Hussain, M., Ishfaq, M., Ahmad, M., & Anjum, M. Z. (2019). Lead toxicity in plants: Impacts and remediation. *Journal of Environmental Management*, 250, 109557. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109557>

CAPÍTULO 2

Artigo formatado de acordo com a Acta Botanica Brasílica

TOLERÂNCIA DE *Handroanthus impetiginosus* (Mart ex dc.) AO NÍQUEL

Victor Soares Rodrigues; Sônia Ribeiro Arrudas; Maria das Dores Magalhães Veloso

RESUMO

O níquel (Ni) é um micronutriente essencial para o metabolismo vegetal, participando de diversos processos enzimáticos. No entanto, quando presente em elevadas concentrações, torna-se tóxico, inibindo a germinação e desencadeando sintomas de estresse oxidativo, como clorose e necrose. O acúmulo de Ni no solo, geralmente decorrente de atividades industriais, representa um risco ambiental significativo, devido ao seu potencial de bioacumulação e biomagnificação ao longo da cadeia trófica. Embora existam métodos físicos e químicos eficazes para remediar solos contaminados por metais, esses apresentam alto custo e podem comprometer a qualidade do solo. Nesse contexto, a fitorremediação se destaca como uma alternativa biotecnológica viável, utilizando plantas para descontaminar e revegetar áreas degradadas. Espécies ornamentais como *Handroanthus impetiginosus* (ipê-roxo) são particularmente promissoras, pois aliam potencial paisagístico à redução do risco de transferência dos contaminantes, uma vez que não usadas como alimentos. Dentro deste contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a tolerância de *H. impetiginosus* ao Ni em solo contaminado por Ni em diferentes dosagens (0, 30, 70, 100 e 130 mg kg⁻¹). Para isso, foi conduzido um experimento em casa de vegetação, duração de 120 dias, no qual se avaliaram parâmetros de emergência, biometria, conteúdo de pigmentos fotossintéticos e teor de Ni nas raízes e folhas. Os resultados indicaram que *H. impetiginosus* tolerou as concentrações testadas de Ni, sem grandes alterações nos parâmetros biométricos, mas ganho no teor de pigmentos fotossintéticos. Além disso, a espécie demonstrou uma baixa capacidade de translocar o Ni à parte aérea, acumulando-o majoritariamente nas raízes, com Fator de Bioconcentração superior a um nas maiores dosagens testadas. Esses dados reforçam o potencial de *H. impetiginosus* como espécie fitoestabilizadora para áreas contaminadas por Ni.

Termos de indexação: biorremediação; restauração; tolerância.

INTRODUÇÃO

Metais estão naturalmente presentes tanto na crosta terrestre, quanto nos solos, usualmente, em concentrações baixas. Alguns destes elementos como Zn (Zn), Cobre (Cu), Níquel (Ni) e Cobalto (Co), por exemplo, são considerados micronutrientes indispensáveis ao bom funcionamento metabólico e ao crescimento vegetal. Não obstante, quando estes encontram-se dispostos em altas concentrações, podem induzir o surgimento de efeitos tóxicos (Tang et al., 2022).

Este desequilíbrio na disponibilidade de metais presente no ambiente está intrinsecamente relacionado à intensificação das atividades antrópicas, posto que os solos atuam como sumidouros de metais potencialmente tóxicos oriundos de atividades de mineração, metalurgia, efluentes industriais, resíduos urbanos, defensivos agrícolas, fertilizantes etc. (Gascó et al., 2020).

Entre os metais que são usualmente encontrados em solos contaminados, o Ni (número atômico 28 e peso atômico 58,69 u) se destaca. Ele é um elemento essencial às plantas em pequena quantidade, posto que participa da constituição de enzimas muito importantes, como metaloenzimas, urease, hidrogenase Ni-Fe, superóxidos dismutase. Não obstante, em elevadas concentrações, o Ni se torna tóxico às plantas, provocando efeitos deletérios, como redução de germinação, inibição do crescimento, redução do teor de clorofila, além de induzir estresse oxidativo (Pishchik et al., 2021; Hassan et al., 2019; Mustafa et al, 2023).

Além dos impactos diretos sobre as plantas, a contaminação do solo por Ni representa um risco ecotoxicológico ao ambiente. A biodisponibilidade do Ni, determinada pelas propriedades físico-químicas do solo e pelas formas químicas em que o metal se apresenta, influencia diretamente sua absorção pelas raízes e seu potencial de toxicidade. Em solos

contaminados, o Ni pode ser adsorvido por argilas, óxidos, hidróxidos e substâncias húmicas, e sua ligação com esses componentes pode variar em força e estabilidade (Mustafa et al., 2023).

Diferentemente de compostos orgânicos, o Ni, assim como outros metais potencialmente tóxicos, não é biodegradável, e seu acúmulo persistente nos solos e nas águas favorece sua entrada na cadeia alimentar. Desta forma, o Ni pode ser depositado nos tecidos dos organismos vivos, bioacumulando-se, e suas concentrações aumentarem em direção aos níveis tróficos superiores da cadeia alimentar (biomagnificação) (Ali; Khan; Sajad., 2013).

Dentro do contexto exposto, diversas estratégias vêm sendo estudadas para minimizar a entrada e o acúmulo de Ni no ambiente e, conseqüentemente, na cadeia alimentar. As técnicas de remediação disponíveis incluem abordagens físicas, químicas e biológicas. As técnicas físicas e químicas para remoção de Ni, como substituição do solo, isolamento, eletrocinética, lavagem e imobilização, embora eficazes, apresentam limitações como alto custo, alterações nas propriedades do solo, impactos sobre a microbiota e risco de formação de poluentes secundários (Ali, Khan & Sajad, 2013; Mustafa et al., 2023).

Dada as limitações, há um interessante crescente no desenvolvimento e na aplicação de técnicas *in situ*, que tenham custo reduzido e sejam ambientalmente sustentáveis, possibilitando não apenas a descontaminação do solo, mas também a recuperação dos metais depositados (Gascó et al., 2020). Neste cenário, a fitorremediação ganha destaque como uma alternativa ecologicamente correta, que utiliza plantas para absorver, estabilizar ou transformar os contaminantes presentes no solo. Essa estratégia engloba diferentes mecanismos, como fitoextração, fitoestabilização, fitovolatilização, fitodegradação, fitodesalinização e fitofiltração (Khan et al., 2022).

Entre as diferentes abordagens, o uso de espécies ornamentais tem se mostrado promissor. Isso porque essas plantas geralmente não são destinadas ao consumo humano ou

animal, evitando a introdução de contaminantes na cadeia alimentar. Além disso, promovem a requalificação estética de áreas degradadas, contribuindo para sua valorização paisagística e potencial turístico (Rocha et al., 2022).

Espécies arbóreas nativas do Brasil, como *Cedrela fissilis* (Covre et al., 2020); *Handroanthus heptaphyllus* (Silva et al., 2023); *Anadenanthera colubrina*; *Bixa orellana*, *Peltophorum dubium*, *Handroanthus impetiginosus* e *Handroanthus serratifolius* (Santos et al., 2022) têm sido estudadas por seu potencial na recuperação de áreas degradadas, dada sua adaptação às condições edafoclimáticas regionais e importância ecológica na restauração de ecossistemas.

Entre estas, destaca-se a *H. impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos, popularmente conhecido como ipê-roxo, por apresentar uma ampla distribuição geográfica, alto valor ecológico, ornamental e econômico, além de elevada resistência a altas doses de metais (Gai; Santos; Vieira., 2017; Meyer et al., 2016).

Considerando a importância da seleção de espécies adaptadas a solos contaminados para o sucesso da fitorremediação, este estudo tem como objetivo avaliar o desenvolvimento e tolerância de *H. impetiginosus* em solos contaminados com Ni. Com este fim, investigou-se o impacto de diferentes dosagens de Ni (0, 30, 70, 100 e 130 mg kg⁻¹) na emergência, nos parâmetros biométricos, no surgimento de sintomas e nos pigmentos fotossintéticos. *H. impetiginosus*. A hipótese do estudo é que *H. impetiginosus* pode emergir e se desenvolver em solos contaminados, excluindo este metal dos seus órgãos mais sensíveis.

MATERIAL E MÉTODOS

Coleta e seleção das sementes

Frutos de *H. impetiginosus*, em fase final de deiscência, foram coletados de um indivíduo adulto próximo na área urbana de Montes Claros (16°41'37.6"S, 43°52'.42.4"W) e secos ao ambiente até completarem a deiscência (Almeida et al., 2020). Em seguida, as sementes sem sinais de predação foram selecionadas manualmente e armazenadas até o uso. Uma amostra botânica, folhas e frutos, foi enviada ao Herbário MCMG, para identificação e depósito da espécie (MCMG 8574). A pesquisa foi registrada no Sistema Nacional de Gestão do Patrimônio Genético e do Conhecimento Tradicional Associado (SisGen) (A119749).

Análise química do solo e condições atmosféricas

O meio de cultivo empregado foi uma mistura de solo e areia (2:1). As propriedades químicas foram determinadas de acordo com Teixeira et al (2017). O pH em água foi utilizado para avaliar a acidez ativa. O carbono orgânico foi quantificado pelo método de Walkley & Black. Os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) trocáveis foram obtidos por solução de KCl 1 mol L⁻¹ e titulação com EDTA. O alumínio e acidez trocável foram determinados pelo método de KCl 1 mol L⁻¹, com titulação utilizando NaOH. A acidez potencial (H+Al) foi avaliada pelo método de acetato de cálcio [Ca(OAc)₂] 0,5 mol L⁻¹. O fósforo (P) disponível foi analisado com o extrator Mehlich-1 e medido por colorimetria, já o fósforo remanescente foi determinado a partir do fósforo em solução de equilíbrio, também o por colorimetria. O potássio (K) disponível foi quantificado adotando-se o extrator Mehlich-1 por fotometria de chama. As condições atmosféricas aproximadas, temperatura e umidade, durante o experimento, foram obtidas do Instituto Nacional de Meteorologia (<https://portal.inmet.gov.br/>).

Desenho experimental

O experimento teve delineamento inteiramente casualizado e foi realizado em casa de vegetação, sob sombrite, no Laboratório de Ecologia Vegetal (Leve) da Universidade Estadual de Montes Claros (Unimontes). Ele foi conduzido em vasos, 10 repetições por tratamento, contendo 4000 g de meio de cultivo adubado com N:P:K (10:10:10) por amostra. Excluindo-se o grupo Controle, os vasos foram contaminados com solução de acetato de níquel ($\text{Ni}(\text{OCOCH}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) até atingir as dosagens de níquel de 30, 70, 100 e 130 mg kg^{-1} , conforme resolução 420 de 2009 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), referente às dosagens de investigação, agrícola, residencial e industrial (Brasil, 2009). Posteriormente, em cada repetição, semeou-se oito sementes de *H. impetiginosus* com hilo voltado para baixo. Os vasos foram irrigados manualmente a cada 2 dias, mantendo-se a capacidade de campo em 40%.

Parâmetros de emergência de plântulas de *H. impetiginosus*

A emergência das plântulas foi contabilizada diariamente até que não houvesse, por 10 dias consecutivos, novas emergências. Assim, pode-se contabilizar o percentual de Plântulas Emergidas (PE) (Brasil, 2009), o Tempo Médio de Emergência (TME) (Laboriau; Valadares, 1976) e o Índice de Velocidade de Emergência (IVE) (Maguire, 1962) adaptados para emergência. As fórmulas aparecem abaixo.

$$PE = \frac{N}{A} * 100$$

$$TME = \frac{\sum n * t}{n}$$

$$IVE = \sum \left(\frac{n}{t} \right)$$

Biometria e análise dos sintomas de intoxicação

Após 120 dias do início do experimento, amostrou-se aleatoriamente 07 plântulas por tratamento para biometria. Os indivíduos foram lavados em água em água corrente, água destiladas, secos e separados em parte aérea e radicular. As variáveis biométricas mensuradas incluíram o número de folhas (NF); a altura aérea (AA) e comprimento radicular (CR) (cm) mensurada em régua; o diâmetro do caule (DC) (mm) analisado com um paquímetro digital (MTX-316119); a massa seca aérea (MSA), radicular (MSR) e total (MST) (g) determinada em balança analítica (AD330-Marte Científica), após secagem em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por 72h (Gai; Santos; Vieira., 2017). O Índice de Tolerância (IT) (Shi et al., 2011) e o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) (Dickson; Leaf; Hosner., 1960) foram mensurados, segundo equações descritas abaixo.

$$IT = \frac{\text{Biomassa do tratamento (g)}}{\text{Biomassa controle(g)}}$$

$$IQD = \frac{MST (g)}{\frac{AA (cm)}{DC (mm)} + \frac{MSA (g)}{MSR (g)}}$$

Os indivíduos amostrados também foram investigados quanto a sintomas visuais de intoxicação, avaliando-se a presença de clorose, atrofia dos membros, dessecação e necrose das bordas e ápices (Gai; Santos; Vieira., 2017). A mortalidade foi obtida ao fim do experimento (120° dia), subtraindo-se o total de plântulas emergentes do total de sobreviventes ao fim do experimento.

Teor de pigmentos fotossintéticos

Amostras de 300 mg de folhas frescas foram cortadas em discos foliares e colocadas em tubos *Falcon* contendo 15 mL de solução de acetona a 80% gelada. Elas foram mantidas à

ausência de luz e refrigeradas por 36 horas, visando a extração dos pigmentos fotossintéticos. Após esse período, o sobrenadante foi coletado e as leituras espectrofotométricas foram realizadas nos comprimentos de onda de 645, 663, 652 e 470 nm, correspondendo, respectivamente, às determinações dos teores de clorofila a (mg/g), clorofila b (mg/g), clorofilas totais (mg/g) e carotenoides (mg/L). A solução de acetona a 80% foi utilizada como branco (Lichtenthaler, 1987).

$$Chla = \frac{(12,7 * A663 - 2,69 * A645)V}{(1000 W)}$$

$$Chlb = \frac{(22,9 * A645 - 4,68 * A663)V}{(1000 W)}$$

$$Chltotal = \frac{A652 * 1000 * (\frac{V}{1000} W)}{34,5}$$

$$Carotenóides = \frac{(1000 * A470 - 1,82 * Chla - 85,02 * Chlb)}{198}$$

Digestão, estimativa do teor de níquel, cálculo de FBC e FT

Para a análise de metal nas folhas, foram misturados, em Erlenmeyer de 125 mL, 0,5 g de pó seco e triturado a 15 mL de HNO₃(aq) P.A 65% (v/v) com o sistema aquecido a 180 °C durante 60 minutos. Já as raízes e o solo foram processados adicionando 0,5 g deste material, seco e triturado, a 10 mL HNO₃(aq) P.A 65% (v/v) em aquecimento por 30 min a 190°C e, posteriormente, por 15 min a 200 °C. Os extratos obtidos foram filtrados, recuperados em volume final de 25 mL com água ultrapura e armazenados até as análises. A quantificação de Ni foi determinada em Espectrofotômetro de Absorção Atômica (AAS 240 FS) no modo chamas, elaborando-se uma curva analítica e o limite de quantificação (LQ) foi de 0,250 mg L⁻¹

¹. Os valores de metais nos tecidos obtidos foram usados com a finalidade de se determinar o fator de bioconcentração (FBC) e o fator de translocação (FT), conforme equação abaixo:

$$FBC = \frac{(\text{Metal nas raízes } mg \text{ kg}^{-1})}{(\text{Metal no solo } mg \text{ kg}^{-1})}$$

$$FT = \frac{(\text{Metal nas folhas } mg \text{ kg}^{-1})}{(\text{Metal nas raízes } mg \text{ kg}^{-1})}$$

Análise estatística

Os dados biométricos, o teor de pigmentos, o FBC e FT foram avaliados quanto à distribuição, teste de Shapiro-Wilk, e homoscedasticidade, teste de Levene. Quando esses pressupostos foram atendidos, utilizou-se a análise de variância (ANOVA) e, se $p < 0,05$, o pós-teste de Tukey. Do contrário, usou-se o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis, com pós-teste de Dunn corrigido por Bonferroni, para as comparações múltiplas. Os sintomas foram avaliados de forma descritiva, já o teor de metal nos tecidos foi comparado empregando-se o teste de Student para amostras pareadas. O efeito das dosagens de Ni nas variáveis, (PE, TME, IVE, MST e Mortalidade), foram investigados adotando-se a regressão linear simples. As análises foram conduzidas no software R (4.4.1).

RESULTADOS

Condições experimentais e propriedades químicas do solo

No local do experimento, a temperatura, variou entre 18 °C (min) e 38,9 °C (max) e a umidade relativa do ar oscilou entre 15% (min) e 99% (max). A região possui, segundo Köppen, clima Aw, caracterizado por uma estação chuvosa no verão, período durante o qual o experimento foi executado (Fig.1).

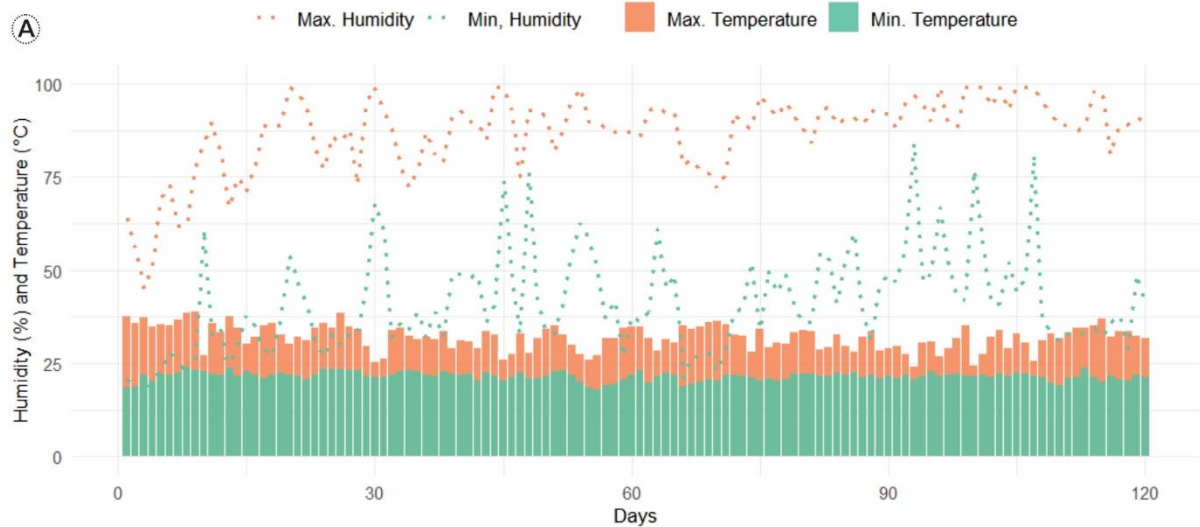


Figura 1. Climatograma das condições atmosféricas durante a realização do experimento e tabela com as propriedades químicas do solo.

O substrato utilizado possui uma acidez fraca pH (6,9), e baixos teores de P (6,2 mg dm⁻³), alto de K (82 mg dm⁻³) e muito alto de Ca (10 cmolc dm⁻³). As demais propriedades são indicadas abaixo (Tab. 1).

Tabela 1. Atributos químicos do substrato.

Atributo	Unidade	Valor
pH em água	-	6,9
P Mehlich	mg dm ⁻³	6,2
P remanescente	mg L ⁻¹	35,6
K	mg dm ⁻³	82
Ca	cmolc dm ⁻³	10
Mg	cmolc dm ⁻³	0,68
Al	cmolc dm ⁻³	0
H + Al	cmolc dm ⁻³	1,02
SB (soma de bases)	cmolc dm ⁻³	10,89
t (CTC efetiva)	cmolc dm ⁻³	10,89
m (saturação por Al)	%	0
T (CTC a pH 7,0)	cmolc dm ⁻³	11,91
V (saturação por bases)	%	91,44
Matéria orgânica	dag kg ⁻¹	2,77
Carbono orgânico	dag kg ⁻¹	1,61

Efeito do níquel na emergência e no desenvolvimento da plântula

Nesta análise, o grupo Controle (41,25%) e os tratamentos de concentrações de Ni, T30 (55%), T70 (58,75%) e T100 (70%) tiveram valores percentuais de emergência inferiores ao tratamento de maior concentração, T130 (66,25%) (Fig. 2A). Com o objetivo de entender o efeito da dosagem de Ni(OCOCH₃)₂.4H₂O₂ na emergência, foi construída uma análise de regressão linear simples para PE (%), TME (dias) e IVE (Fig. 2)

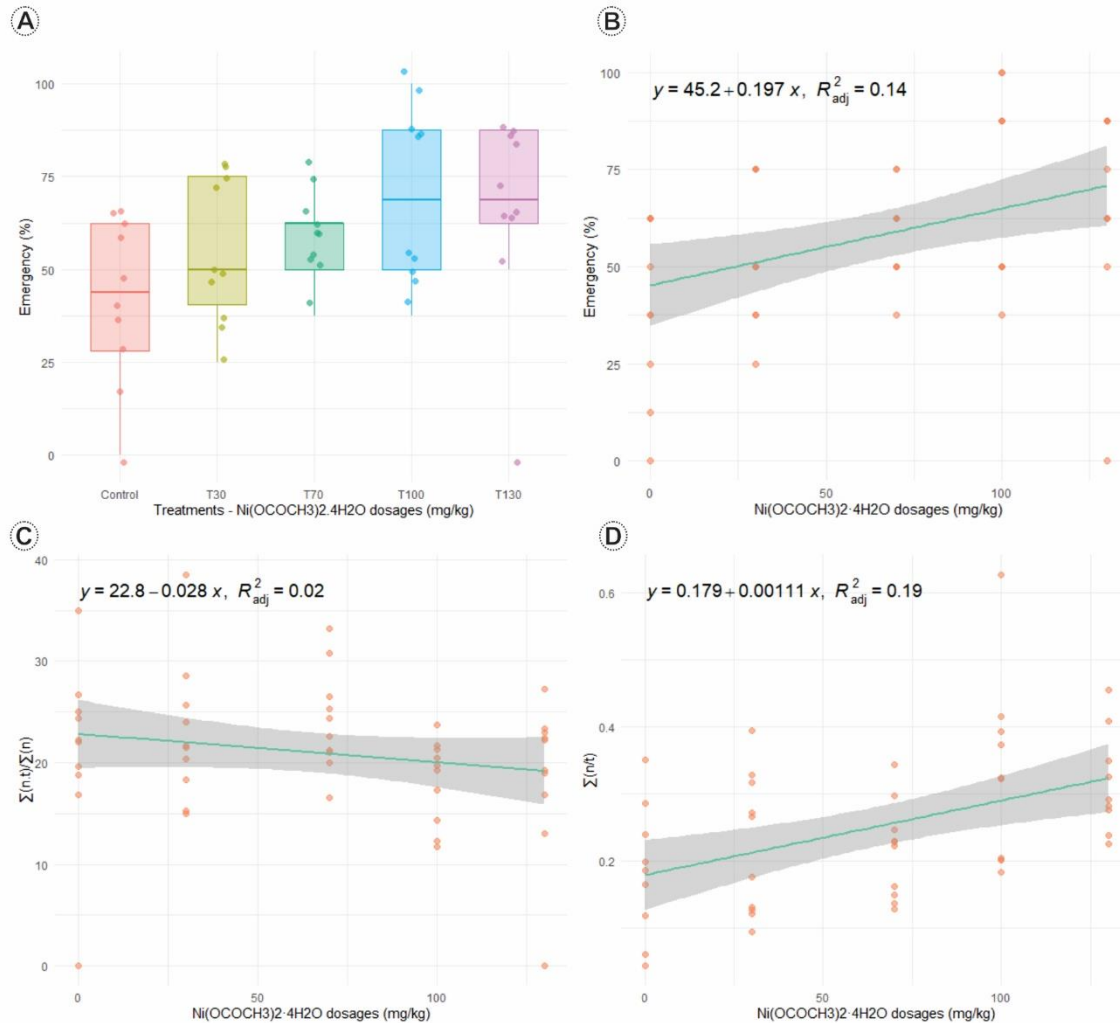


Figura 2. Boxplot descritivo do percentual de plântulas por tratamento (A); regressão linear simples para Percentual de Emergência (%) (B); Tempo Médio de Emergência (dias) (C); e Índice de Velocidade de Emergência (D).

O modelo de regressão linear revelou uma relação estatisticamente significativa entre a dosagem e o PE (%) ($p = 0,0037$), com um coeficiente de determinação ajustado ($R^2 = 0,1449$) indicando que 14,5% da variabilidade observada é explicada pela dose de Ni aplicada. O intercepto estimado foi de (45,24) ($p = 2,28e-11$), representando o valor médio esperado de emergência quando a dosagem é zero. O coeficiente angular estimado ($\beta = 0,197$) indica que, para cada incremento de 1 mg kg^{-1} na dose aplicada, o PE aumenta, em média, 0,20 pontos percentuais ($p = 0,0037$) (Fig. 2B).

Para TME, a regressão linear não mostrou uma relação significativa em relação à dosagem ($p = 0,1831$), com um coeficiente de determinação ajustado ($R^2 = 0,01655$) revelando que apenas 1,6% da variabilidade é observada é explicada pelo modelo. O intercepto estimado (22,82) ($p = 2e-16$) representa o TME na ausência do tratamento. O coeficiente angular (-0,02798) indica uma tendência de redução no TME com o aumento da dose, mas sem significância estatística ($p = 0,183$) (Fig. 2C).

Já sobre IVE, o modelo de regressão linear indicou uma associação estatisticamente significativa entre as variáveis ($p = 0,0012$). O coeficiente de determinação ajustado ($R^2 = 0,1897$) indica que aproximadamente 18,97% da variabilidade no IVE é explicada pela variável dosagem. O intercepto foi estimado em (0,179) ($p = 1,11e-08$), representando o valor médio de IVE na ausência de tratamento. O coeficiente angular ($\beta = 0,0011$), por sua vez, sugere que, para cada incremento de 1 mg kg^{-1} na dose aplicada, o valor do IVE aumenta, em média, 0,0011 unidades ($p = 0,0011$) (Fig. 2D).

Biometria e análise dos sintomas

Neste estudo, não foram encontrados efeito significativo da dosagem de $\text{Ni}(\text{OCOCH}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ na AA, CR, MSR, MAS, NF, IQD e IT ($p > 0,05$), embora o DC das plântulas que cresceram na mais alta concentração de Ni tenha se mostrado mais robusto ($p < 0,05$) (Tab. 2).

Tabela 2. Valores médios obtidos para emergência, os parâmetros biométricos, o IQD e o IT.

Parâmetros	Controle	T30	T70	T100	T130	p-valor	R ² ajus	Test
	(média ± dp)							
PE (%)	41,25 ± 22,8	55 ± 18,81	58,75 ± 11,85	70 ± 24,45	66,25 ± 27,03	0,038	0,14	Linear Regression
TME						0,183	0,02	
IVE						0,00116	0,19	
Mortalidade	74,25 ± 21,45	67,5 ± 34,34	74 ± 28,79	82,85 ± 21,80	82,64 ± 20,67	0,2165	0,011	
AA (cm)	7,5 ± 2,06	6,15 ± 1,21	6,04 ± 1,06	5,94 ± 1,15	7,17 ± 1,39	0,15	-	ANOVA

CR (cm)	8,74 ± 1,18	7,84 ± 1,54	6,27 ± 2,8	7,3 ± 1,46	7,84 ± 1,54	0,15	-	ANOVA
DC (mm)	1,87 ± 0,24 a	1,67 ± 0,27 a	1,72 ± 0,31 a	1,75 ± 0,33 a	2,41 ± 0,27 b	2,19e-4	-	ANOVA
NF	8,28 ± 1,49	7,71 ± 2,28	8,42 ± 1,98	5,85 ± 2,54	8,14 ± 2,26	0,17	-	ANOVA
MSA (g)	0,38 ± 0,19	0,21 ± 0,07	0,2 ± 0,1	0,23 ± 0,17	0,27 ± 0,15	0,27	-	Kruskal-Wallis
MSR (g)	0,14 ± 0,15	0,04 ± 0,02	0,06 ± 0,04	0,09 ± 0,04	0,08 ± 0,06	0,18	-	Kruskal-Wallis
MST (g)	0,53 ± 0,34	0,26 ± 0,09	0,27 ± 0,14	0,32 ± 0,21	0,36 ± 0,2	0,32	-3,4e-4	Linear Regression
IQD	0,07 ± 0,07	0,03 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,05 ± 0,03	0,05 ± 0,03	0,29	-	Kruskal-Wallis
IT	1 ± 0,64	0,48 ± 0,18	0,51 ± 0,27	0,61 ± 0,39	0,68 ± 0,38	0,3	-	Kruskal-Wallis

Em: Emergência (%); NF: Número de folhas; AA: Altura aérea (cm); CR: Comprimento de raiz (cm); DC: Diâmetro de caule (mm); MSA: massa seca aérea (g); MSR: massa seca radicular (g); MST: Massa seca total (g); IQD: Índice de Qualidade de Dickson; IT: Índice de Tolerância. Letras diferentes representam os tratamentos onde há diferença significativa a 5% de significância.

A massa seca é o principal parâmetro de crescimento da planta. Neste estudo, a média da MST por tratamento foi máxima no grupo Controle e reduziu à medida em que houve redução da dosagem de aceto de níquel (Tab. 2). A dispersão das amostras por tratamento pode ser observada abaixo (Fig. 3A). Com o propósito de compreender o efeito da dosagem de Ni nesta variável, foi construída uma regressão linear simples (Fig. 3B).

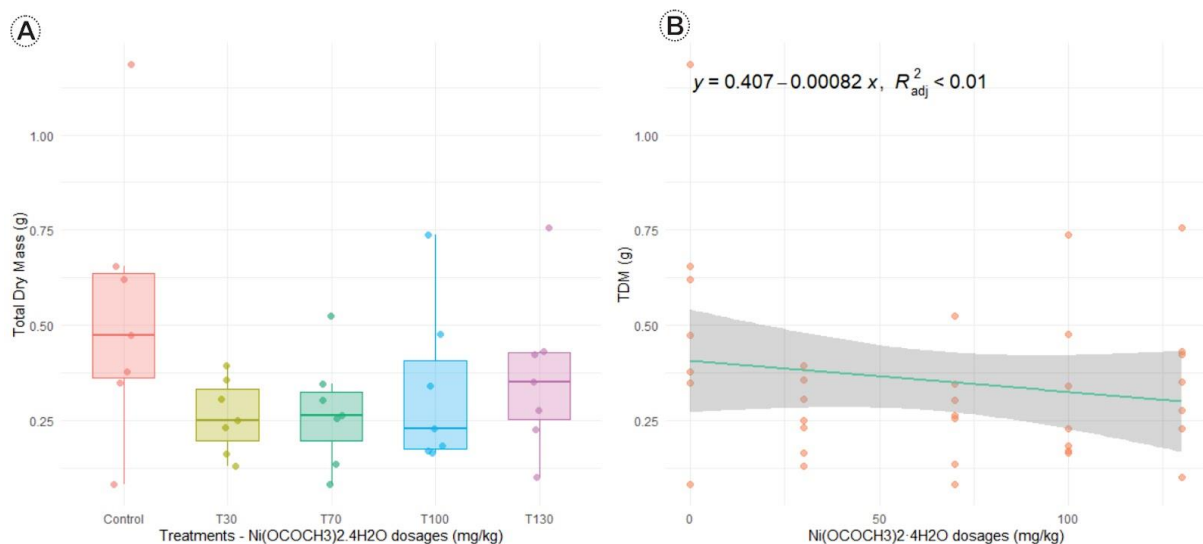


Figura 3. Gráfico descritivo da Massa Seca Total (g) por tratamento (A) e regressão linear simples da variação da Massa Seca Total (g) total em função do aumento da dosagem de Ni(OCOCH₃)₂·4H₂O (B).

O modelo obtido não apresentou significância estatística ($p = 0,3274$), com o coeficiente de determinação ajustado sugerindo um efeito muito baixo da dosagem de Ni sobre a massa

seca ($R^2 = -3,4e-4$), enquanto que o coeficiente angular ($8,2e^{-4}$) revela sua redução à medida em que se aumenta a dose de Ni, mas sem significância estatística ($p = 0,32$) (Fig. 3B).

Sintomas de intoxicação

As plântulas cresceram bem e todos os tratamentos apresentam folhas compostas com 1-3 folíolos (Fig. 4A). Excetuando-se os tratamentos T70, que não apresentou dessecação, e T100, sem dessecação e atrofia, todos os demais sintomas foram distribuídos entre os tratamentos, com necrose afetando 100% das amostras no grupo Controle, T30 e T70, enquanto que clorose afetou especialmente os tratamentos T30, T70, T100 e T130, presente entre T70 e 85% de todos os indivíduos amostrados (Fig. 4B).

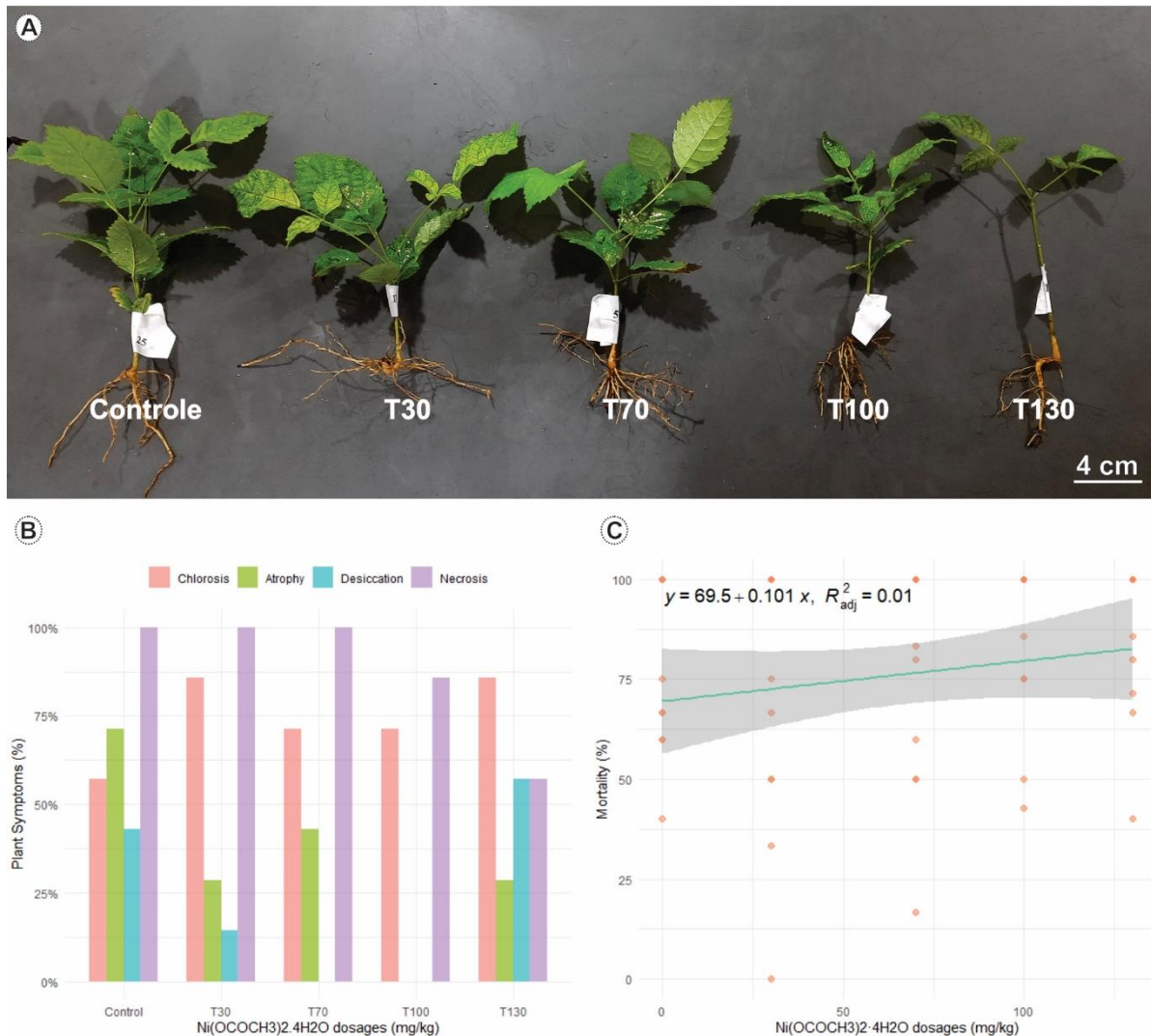


Figura 4. A. Visão panorâmica das mudas em diferentes tratamentos (A); Análise descritiva (%) dos sintomas por tratamento (B) e Regressão Linear da Mortalidade em função do aumento da dose de Ni(OCOCH₃)₂·4H₂O (C).

Apesar da presença de sintomas de clorose e necrose em todos os tratamentos, observou-se elevada mortalidade ao longo do experimento, com valores médios superiores a 65% (Fig. 4C). A análise regressão linear indicou que não houve associação significativa entre a mortalidade e a dosagem de Ni aplicada ($p = 0,2165$), com coeficiente ajustado ($R^2 = 0,01198$), explicando apenas 1,1% da variabilidade da mortalidade observada, embora o coeficiente angular ($\beta = 0,101$) aponte uma tendência de aumento da mortalidade com acréscimo da dose de poluente, este efeito não foi significativo ($p = 0,217$).

Teor de clorofila a, b, totais e carotenoides

Todos os parâmetros de pigmentos fotossintéticos apresentaram variação significativa entre os tratamentos. Os menores teores de clorofila (a), clorofila (b), clorofila total e carotenoides foram observados no Controle e em T30. O tratamento T70 apresentou os maiores teores para todos os pigmentos analisados, que foram reduzidos com o aumento da concentração de Ni em T100 e T130 (Tab. 3).

Tabela 3. Valores médios obtidos para o conteúdo de pigmentos fotossintéticos.

Pigmentos	Controle	T30	T70	T100	T130	p-valor	Teste
	(média ± dp)						
Clorofila (a)	0,57 ± 0 ac	0,48 ± 0,04 c	0,92 ± 0,02 d	0,84 ± 0,1 bd	0,70 ± 0,04 ab	7,43e-06	Anova
Clorofila (b)	0,13 ± 0,01 a	0,16 ± 0,02 ad	0,33 ± 0,01 c	0,24 ± 0,05 b	0,21 ± 0,01 b	5,43e-05	
Clorofila Total	0,71 ± 0 ac	0,65 ± 0,03 a	1,31 ± 0,41 c	1,10 ± 0,17 bc	0,94 ± 0,06 bde	1,67e-05	
Carotenoides	1,52 ± 0,05 a	1,49 ± 0,1 a	2,97 ± 0,1 bc	2,43 ± 0,41 ac	2,08 ± 0,14 ab	0,01	Kruskal-Wallis

Os teores de clorofila são mensurados em (g/mg) e de carotenoides (g/L). Letras diferentes representam os tratamentos onde há diferença significativa a 5% de significância.

Quantificação de níquel nos tecidos, FBC e FT

A quantificação de metal nos tecidos indicou uma maior existência (%) de Ni (mg kg⁻¹) nas raízes de todos os tratamentos. O grupo controle, no entanto, foi aquele que apresentou uma distribuição mais equilibrada entre a parte aérea e o sistema radicular, com as raízes e folhas acumulando, respectivamente, 59,27 e 40,7% do metal quantificado, enquanto que nos tratamentos de maior concentração, a raiz foi responsável por armazenar, aproximadamente, 85% do Ni (Fig. 5A).

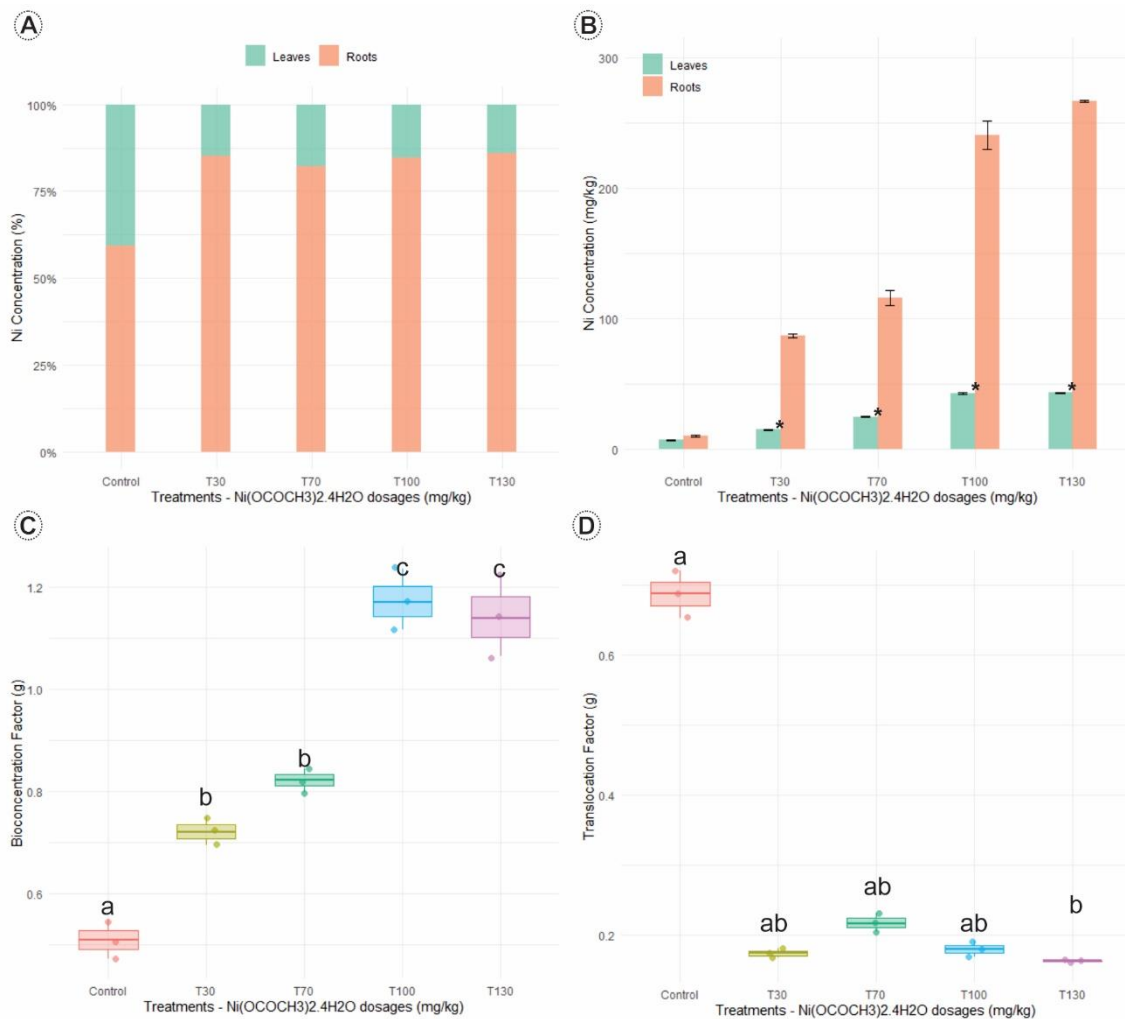


Figura 5: Teor (%) de Ni nos tecidos (A); Concentração de Ni (mg kg^{-1}) nas folhas e raízes (B); Fatores de Bioconcentração (C) e Fatores de Translocação (D). Letras diferentes representam tratamentos que diferiram estatisticamente a (5%) de significância.

As variáveis relacionadas à absorção e translocação de Ni (FBC e FT) apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. O FBC aumentou progressivamente com o acréscimo da dose aplicada ($p = 6,34 \times 10^{-8}$), variando de $0,51 \pm 0,03$ no grupo Controle até valores superiores a 1 nos tratamentos com maiores concentrações, como T100 ($1,17 \pm 0,05$) e T130 ($1,14 \pm 0,07$). Por outro lado, o FT apresentou comportamento inverso ($p = 0,01$), com o maior valor registrado no controle ($0,68 \pm 0,03$) e reduções acentuadas nos tratamentos T100 ($0,17 \pm 0,011$) e T130 ($0,16 \pm 0$), sugerindo uma limitação na translocação do metal para a parte aérea em doses mais elevadas. A dispersão das amostras pode ser

observada acima (Fig. 5C). Os valores médios e os testes estatísticos referentes ao conteúdo de metais, bem como aos FBC e FT, estão apresentados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4. Valores médios do conteúdo de Pb (mg/kg) nas folhas e nas raízes.

Tratamentos	Folhas (média ± dp)	Raízes (média ± dp)	p-valor	Teste
Controle	7,1 ± 0,65	10,31 ± 0,4	0,62	Student's test
T30	15,17 ± 0,37	87,32 ± 1,42	4,95e-05	
T70	25,12 ± 0,32	115,95 ± 5,95	0	
T100	43,15 ± 0,75	240,3 ± 10,95	0	
T130	43,4 ± 0,5	266,55 ± 0,6	1,9e-10	

Valores médios de teor de Ni (mg kg⁻¹) nas folhas e nas raízes. Todos os tratamentos possuem uma quantidade significativamente maior de metal nas raízes a (5%) de significância.

Tabela 5. Média dos Fatores de Bioconcentração e a (5%) de significância.

Parâmetros	Controle	T30	T70	T100	T130	p-valor	Teste
	(média ± dp)						
FBC	0,51 ± 0,03 a	0,72 ± 0,02 b	0,82 ± 0,02 b	1,17 ± 0,05 c	1,14 ± 0,07 c	6,34e-08	ANOVA
FT	0,68 ± 0,03 a	0,17 ± 0 ab	0,21 ± 0,01 ab	0,17 ± 0,011 ab	0,16 ± 0 b	0,01	Kruskal-Wallis

FBC: Fator de Bioconcentração; TF: Fator de Translocação. Letras diferentes indicam tratamentos com diferença significativa a 5% de significância.

DISCUSSÃO

O Ni é um micronutriente essencial que, dependendo do pH, pode existir em diversas formas químicas, como Ni²⁺, Ni(OH)₂, Ni₃O₄, Ni₂O₃, NiO₂, HNiO₂, NiSO₄, NiHCO₃⁺ e NiCO₃ (Kumar, 2021). Nos organismos vivos, o Ni desempenha funções vitais em baixas concentrações, integrando enzimas como a acetil coenzima-A sintase, monóxido de carbono desidrogenase, hidrogenases, metil coenzima M redutase, RNase-A, urease e superóxido dismutase (Mustafa, 2023). Entretanto, em concentrações elevadas, torna-se tóxico, reduzindo a germinação, induzindo clorose e necrose, além de inibir processos fisiológicos como fotossíntese e transpiração (Hassan et al., 2019).

Baseando-se nas propriedades do Ni, este estudo investigou o impacto de diferentes dosagens de Ni (0, 30, 70, 100 e 130 mg kg⁻¹) sobre a emergência, biometria, sintomas visuais,

pigmentos fotossintéticos e bioacumulação em *H. impetiginosus*, visando compreender a resposta fisiológica da espécie e seu potencial fitorremediador em ambientes contaminados por Ni.

A primeira variável analisada foi a emergência, fase crítica para o estabelecimento da cultura, influenciada por condições fisiológicas e ambientais. Verificou-se que as diferentes doses de Ni impactaram significativamente a PE das plântulas, levemente o IVE, mas não a TME. Curiosamente, o tratamento com maior concentração (T130) apresentou maior percentual de emergência (66,25%) em relação ao controle (41,25%) e aos demais tratamentos (T30, T70, T100), sugerindo um possível efeito estimulante do Ni em determinadas faixas de concentração. A análise de regressão linear confirmou essa tendência, com significância estatística ($p = 0,0037$), embora a variabilidade explicada tenha sido moderada ($R^2 = 0,1449$).

Este padrão pode ser explicado pela função do Ni como micronutriente essencial. Em baixas concentrações, ele participa da ativação de enzimas como urease e glioxalase, além de atuar no crescimento vegetativo e reprodutivo, metabolismo do nitrogênio e germinação de sementes (Shahzad et al., 2018; Ahmad; Ashraf, 2011).

Apesar disso, o efeito do Ni sobre a germinação é variável, influenciado tanto pela forma química do sal quanto pela via de aplicação. Segundo Léon et al. (2005), a toxicidade segue a ordem: acetato de Ni < sulfato de Ni < cloreto de Ni. Em *Raphanus sativus*, por exemplo, doses crescentes de NiSO₄ (0–200 µmol L⁻¹) afetam o desenvolvimento da radícula e a absorção de Mg e K, mas apenas a partir de 100 µmol L⁻¹ a germinação é significativamente inibida, sendo completamente suprimida em 400 µmol L⁻¹ (Espem, Pirovano; Cocucci, 1997).

Resultados semelhantes foram observados em *Oryza sativa* L., com inibição significativa da germinação após 48h com 200 e 400 µmol L⁻¹ de NiSO₄, além de reduções no crescimento de raízes (48–53%) e brotos (20–29%), respectivamente, após 120h em relação ao

controle (Maheshwari; Dubey, 2008). Em *Grevillea*, o acetato de Ni em 100 mg L⁻¹ não comprometeu a germinação, enquanto o cloreto de Ni a 5 mg L⁻¹ já causava redução de 20% (Léon et al., 2005). Para *Cajus canan*, a germinação entre 0,5–1,5 mmol L⁻¹ também foi severamente afetada, principalmente na biomassa seca da raiz e das folhas (Rao; Sresty, 2000).

Além dos dados fenotípicos, evidências anatômicas reforçam a hipótese de mecanismos de proteção durante a germinação. Em *Thlaspi pindicum*, hiperacumuladora de Ni, o metal é preferencialmente localizado na região micropilar oposta à radícula e na epiderme dos cotilédones, não sendo detectado no embrião (Psaras; Manetas, 2001). O acúmulo do metal no tegumento parece restringir sua entrada no embrião, atuando como uma barreira de proteção (Léon et al., 2005).

Quanto à biometria, os tratamentos com Ni não causaram efeitos significativos na AA, CR, NF, MSA, MSR, IQD e IT. A única diferença significativa foi no DC, que aumentou cerca de 33% em relação ao Controle. E, embora o Controle tenha apresentado maior MST média (0,53 g), a análise de regressão não indicou efeito significativo ($p = 0,32$) sugerindo ausência de correlação entre a dose aplicada e a biomassa total.

Os sintomas visuais, como clorose e necrose, estiveram presentes em todos os tratamentos, sendo a dessecação ausente apenas em T70, e ocorrência de atrofia e necrose em T100. Neste estudo, a mortalidade foi elevada (>50%) em todos os grupos, mas sem significância estatística ($p = 0,2165$), não tendo relação com a dose de Ni aplicada.

Esse comportamento contrasta com o observado em outras espécies. Em *Medicago sativa*, doses de 500 mg kg⁻¹ reduzem o comprimento da parte aérea e radicular em cerca de 33% e 32,25%, respectivamente, e diminuem significativamente a biomassa (Helaoui et al., 2020). Em *Ocimum basilicum* L., 150 mg kg⁻¹ já reduzem a altura, enquanto doses acima de

100 mg kg⁻¹ comprometem o peso fresco e seco dos brotos, folhas e raízes (Davoudi et al., 2023). De forma semelhante, em *Eleusine coracana* (L.) Gaertn., concentrações de Ni acima de 100 µmol L⁻¹ causam reduções de até 89,3% (massa seca) e 78,1% (massa fresca) nas partes aérea e radicular (Khaliq et al., 2015). Já em *Solanum lycopersicum* L., doses tão baixas quanto 50 µmol L⁻¹ induzem efeitos negativos significativos (Altaf et al., 2021; Yu et al., 2024).

A concentração de pigmentos fotossintéticos também é amplamente utilizada como indicador de estresse em plantas (Mustafa, 2023). Em *H. impetiginosus*, a produção de clorofila (a), (b), total e carotenoides aumentaram em função da concentração de Ni, atingindo valores máximos em T70, com posterior declínio até T130. Esses resultados indicam uma resposta dose-dependente e corroboram a tolerância da espécie ao Ni. Resultado semelhante foi descrito em *O. basilicum*, em que 70 mg kg⁻¹ de Ni também aumentou os teores de clorofila e carotenoides, seguidos por redução em 100 mg kg⁻¹ (Davoudi et al., 2023). Em cultivo hidropônico, doses de até 15 mg L⁻¹ também favorecem o crescimento de batata-doce (Kumar et al., 2022). Já *Theobroma cacao* tolera até 300 mg kg⁻¹ de Ni, com redução de 75% em clorofila (a), 25% em clorofila (b) e aumento de até 75% em carotenoides em 500 mg kg⁻¹ (Silva et al., 2023).

Quanto ao teor de Ni absorvido, *H. impetiginosus* demonstrou capacidade de bioacumulação no sistema radicular, com FBC superior a 1 nos tratamentos T100 e T130, acumulando o máximo de 266,55 mg kg⁻¹. O FT, por outro lado, diferiu-se apenas no Controle, mantendo-se próximo de 0,2 nos demais tratamentos.

A absorção de Ni²⁺ pode ocorrer por difusão passiva ou transporte ativo, sendo translocado tanto via apoplasto quanto simplasto, com acúmulo predominante nas paredes celulares e nos protoplastos das células radiculares (Seregin; Kozhevnikova, 2006). Nas raízes, a endoderme atua como uma barreira seletiva, limitando a movimentação apoplástica e

permitindo controle seletivo via estrias de Caspary (Hosmani et al., 2013), o que pode explicar o maior acúmulo de Ni nas raízes.

Afora isso, a tolerância ao Ni também tem sido atribuída à complexação do metal com compostos como ácidos orgânicos, peptídeos e aminoácidos (Cataldo et al., 1988), como histidina (Kerkeb; Krämer, 2003), nicotinamida (Pianelli et al., 2005; Vacchina et al., 2003).

Estudos ômicos em *Leersia hexandra* revelam alterações na expressão de transportadores ABC, superexpressão de NRAMP3, BZIP24, BZIP22 e metalotioneínas MT4A e MT4C, além da expressão diferencial de NAS3 e seu precursor SAM, envolvidos na formação de complexos NA-Ni que reduzem a toxicidade do metal e aumentando a tolerância da planta (Fu et al., 2024). As plantas também ativam mecanismos antioxidantes para mitigar danos causados por espécies reativas de oxigênio (ROS), regulando enzimas como APX7, SODCP, SOD1 e CATA (Chen et al., 2024).

Em suma, o leve efeito observado na emergência, a estabilidade dos parâmetros biométricos e dos teores de pigmentos fotossintéticos, aliada ao acúmulo de Ni predominantemente nas raízes, indicam que *H. impetiginosus* apresenta tolerância às concentrações de Ni testadas. Esses resultados reforçam o potencial da espécie para aplicação em estratégias de fitoestabilização em áreas contaminadas por Ni.

CONCLUSÃO

A espécie *H. impetiginosus* mostrou-se capaz de emergir e se desenvolver em solos contaminados por doses crescentes de Ni (30, 70, 100 e 130 mg kg⁻¹), sem grandes alterações nos seus parâmetros biométricos. Os sintomas de toxicidade foram bem distribuídos entre os tratamentos, embora a dessecação foliar tenha sido ausente nas concentrações de 70 e 100 mg kg⁻¹. O conteúdo de pigmentos fotossintéticos aumentou com a elevação de Ni aplicado,

atingido valores máximos de clorofila a, b, totais e carotenoides em 70 mg kg⁻¹. A respeito do padrão de bioacúmulo, *H. impetiginosus* é capaz de acumular Ni no seu sistema radicular, alcançando um FBC superior a 1 nas duas maiores dosagens. Estes resultados qualificam a espécie como fitoestabilizadora de ambientes contaminados por Ni nas concentrações avaliadas.

REFERÊNCIAS

- Ahmad, M. S. A., & Ashraf, M. (2011). Essential roles and hazardous effects of nickel in plants. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 214, 125–167. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0668-6_6
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- ALMEIDA, D. M et al. Efeito de diferentes substratos no desenvolvimento inicial de mudas de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC). *Brazilian Journal of Development*,6(5):24619-24631, 2020.
- BRASIL. (2009). Regras para análise de sementes. Brasília: Ministério Da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. p. 395.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA N° 420, de 28 de dezembro de 2009.
- Cataldo, D. A., McFadden, K. M., Garland, T. R., & Wildung, R. E. (1988). Organic constituents and complexation of nickel(Ii), iron(Iii), cadmium(Ii), and plutonium(Iv) in soybean xylem exudates. *Plant Physiology*, 86(3), 734–739. <https://doi.org/10.1104/pp.86.3.734>
- Chen, M., Jiang, P., Zhang, X., Sunahara, G. I., Liu, J., & Yu, G. (2024). Physiological and biochemical responses of *Leersia hexandra* Swartz to nickel stress: Insights into antioxidant defense mechanisms and metal detoxification strategies. *Journal of Hazardous Materials*, 466, 133578. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133578>
- Covre, W. P., Pereira, W. V. D. S., Gonçalves, D. A. M., Teixeira, O. M. M., Amarante, C. B. D., & Fernandes, A. R. (2020). Phytoremediation potential of *Khaya ivorensis* and *Cedrela fissilis* in copper contaminated soil. *Journal of Environmental Management*, 268, 110733. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110733>
- Davoudi, M., Esmailpour, B., Gohari, G., Soltani Toolarood, A. A., Sheikhalipour, M., Fatemi, H., Haghghi, M., & Farooq, M. (2022). Morphophysiological responses of sweet basil

(*Ocimum basilicum* L.) to the nickel stress and inoculation with *Pseudomonas* strains. *Acta Physiologiae Plantarum*, 45(1), 9. <https://doi.org/10.1007/s11738-022-03479-33>

DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality of White Spruce and White Pine seedling stock in nurseries. *The Forestry Chronicle*, 10-13, 1960

Espen, L., Pirovano, L., & Cocucci, S. M. (1997). Effects of Ni²⁺ during the early phases of radish (*Raphanus sativus*) seed germination. *Environmental and Experimental Botany*, 38(2), 187–197. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(97\)00011-7](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(97)00011-7)

Fu, Y., Lin, Y., Deng, Z., Chen, M., Yu, G., Jiang, P., Zhang, X., Liu, J., & Yang, X. (2024). Transcriptome and metabolome analysis reveal key genes and metabolic pathway responses in *Leersia hexandra* Swartz under Cr and Ni co-stress. *Journal of Hazardous Materials*, 473, 134590. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134590>

Gai, A. P. C., Dos Santos, D. S., & Vieira, E. A. (2017). Effects of zinc excess on antioxidant metabolism, mineral content and initial growth of *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos Mattos and *Tabebuia roseoalba* (Ridl.) Sandwith. *Environmental and Experimental Botany*, 144, 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.09.006>

Gascó, G., Álvarez, M. L., Paz-Ferreiro, J., & Méndez, A. (2019). Combining phytoextraction by *Brassica napus* and biochar amendment for the remediation of a mining soil in Riotinto (Spain). *Chemosphere*, 231, 562–570. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.168>

Hassan, M. U., Chattha, M. U., Khan, I., Chattha, M. B., Aamer, M., Nawaz, M., Ali, A., Khan, M. A. U., & Khan, T. A. (2019). Nickel toxicity in plants: Reasons, toxic effects, tolerance mechanisms, and remediation possibilities—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(13), 12673–12688. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04892-x>

Helaoui, S., Boughattas, I., Hattab, S., Mkhinini, M., Alphonse, V., Livet, A., Bousserrhine, N., & Banni, M. (2020). Physiological, biochemical and transcriptomic responses of *Medicago sativa* to nickel exposure. *Chemosphere*, 249, 126121. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126121>

Hosmani, P. S., Kamiya, T., Danku, J., Naseer, S., Geldner, N., Guerinot, M. L., & Salt, D. E. (2013). Dirigent domain-containing protein is part of the machinery required for formation of the lignin-based Casparian strip in the root. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(35), 14498–14503. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308412110>

Kerkeb, L., & Krämer, U. (2003). The role of free histidine in xylem loading of nickel in *Alyssum lesbiacum* and *Brassica juncea*. *Plant Physiology*, 131(2), 716–724. <https://doi.org/10.1104/pp102.010686>

Khaliq, A., Ali, S., Hameed, A., Farooq, M. A., Farid, M., Shakoor, M. B., Mahmood, K., Ishaque, W., & Rizwan, M. (2016). Silicon alleviates nickel toxicity in cotton seedlings through enhancing growth, photosynthesis, and suppressing Ni uptake and oxidative stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(5), 633–647. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1073263>

- Kumar, A., Jigyasu, D. K., Kumar, A., Subrahmanyam, G., Mondal, R., Shabnam, A. A., Cabral-Pinto, M. M. S., Malyan, S. K., Chaturvedi, A. K., Gupta, D. K., Fagodiya, R. K., Khan, S. A., & Bhatia, A. (2021). Nickel in terrestrial biota: Comprehensive review on contamination, toxicity, tolerance and its remediation approaches. *Chemosphere*, 275, 129996. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129996>
- Kumar, S., Wang, M., Liu, Y., Fahad, S., Qayyum, A., Jadoon, S. A., Chen, Y., & Zhu, G. (2022). Nickel toxicity alters growth patterns and induces oxidative stress response in sweetpotato. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1054924>
- Laboriau, L. G., Valadares, M. E. B. (1976). On the germination of seeds *Calotropis procera* (Ait.) f. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 48(2), 263-284.
- Léon, V., Rabier, J., Notonier, R., Barthelémy, R., Moreau, X., Bouraïma-Madjèbi, S., Viano, J., & Pineau, R. (2005). Effects of three nickel salts on germinating seeds of *grevillea exul* var. *Rubiginosa*, an endemic serpentine proteaceae. *Annals of Botany*, 95(4), 609–618. <https://doi.org/10.1093/aob/mci066>
- Lichtenthaler, H. K. (1987). [34] Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. Em *Methods in Enzymology* (Vol. 148, p. 350–382). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
- Madhava Rao, K. V., & Sresty, T. V. S. (2000). Antioxidative parameters in the seedlings of pigeonpea (*cajanus cajan* (L.) Millspaugh) in response to Zn and Ni stresses. *Plant Science*, 157(1), 113–128. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(00\)00273-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(00)00273-9)
- Maguire, J. D. (1962). Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, 2(1), 176-177.
- Maheshwari, R., & Dubey, R. S. (2008). Inhibition of ribonuclease and protease activities in germinating rice seeds exposed to nickel. *Acta Physiologiae Plantarum*, 30(6), 863–872. <https://doi.org/10.1007/s11738-008-0192-0>
- Meyer, S. T., Castro, S. R., Fernandes, M. M., Soares, A. C., De Souza Freitas, G. A., & Ribeiro, E. (2016). Heavy-metal-contaminated industrial soil: Uptake assessment in native plant species from Brazilian Cerrado. *International Journal of Phytoremediation*, 18(8), 832–838. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1146224>
- Mustafa, A., Zulfqar, U., Mumtaz, M. Z., Radziemska, M., Haider, F. U., Holatko, J., Hammershmiedt, T., Naveed, M., Ali, H., Kintl, A., Saeed, Q., Kucerik, J., & Brtnicky, M. (2023). Nickel (Ni) phytotoxicity and detoxification mechanisms: A review. *Chemosphere*, 328, 138574. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138574>
- Pianelli, K., Mari, S., Marquès, L., Lebrun, M., & Czernic, P. (2005). Nicotianamine over-accumulation confers resistance to nickel in *arabidopsis thaliana*. *Transgenic Research*, 14(5), 739–748. <https://doi.org/10.1007/s11248-005-7159-3>

Pishchik, V., Mirskaya, G., Chizhevskaya, E., Chebotar, V., & Chakrabarty, D. (2021). Nickel stress-tolerance in plant-bacterial associations. *PeerJ*, 9, e12230. <https://doi.org/10.7717/peerj.12230>

Psaras, G. K., & Manetas, Y. (2001). Nickel localization in seeds of the metal hyperaccumulator *thlaspi pindicum* hausskn. *Annals of Botany*, 88(3), 513–516. <https://doi.org/10.1006/anbo.2001.1470>

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T.; VENEGAZ, V. H. A. 5a Aproximação-Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. Editora UFV, Viçosa, Minas Gerais, 1999.

Santos, T. R. S., Santos, J. A. S., Pereira, E. G., & Garcia, Q. S. (2023). Revegetation of an area impacted by iron ore tailings: Evaluating fertilization alternatives in native pioneer and secondary trees. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(2), 3760–3773. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22376-3>

Seregin, I. V., & Kozhevnikova, A. D. (2006). Physiological role of nickel and its toxic effects on higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 53(2), 257–277. <https://doi.org/10.1134/S1021443706020178>

Shahzad, B., Tanveer, M., Rehman, A., Cheema, S. A., Fahad, S., Rehman, S., & Sharma, A. (2018). Nickel; whether toxic or essential for plants and environment—A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132, 641–651. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.10.014>

Silva, J. V. dos S., Baligar, V. C., Ahrnet, D., & de Almeida, A.-A. F. (2023). Transcriptomic, osmoregulatory and translocation changes modulates Ni toxicity in *Theobroma cacao*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 196, 624–633. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.01.053>

Silva, V. N., Bernardes, M. M., Pereira, A. A. S., Ferreira, R. A., Pereira, E. G., & Bicalho, E. M. (2023). Seed priming of *handroanthus heptaphyllus* for the restoration of the mining fields. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(1), 31. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-06032-7>

Tang, Z., Wang, H., Chen, J., Chang, J., & Zhao, F. (2023). Molecular mechanisms underlying the toxicity and detoxification of trace metals and metalloids in plants. *Journal of Integrative Plant Biology*, 65(2), 570–593. <https://doi.org/10.1111/jipb.13440>

Teixeira, T. C. et al. MANUAL DE MÉTODOS DE ANÁLISE DE SOLO. 3. ed. [S. l.: s. n.], 2017. 573 p. ISBN 978-85-7035-771-7.

Vacchina, V., Mari, S., Czernic, P., Marquès, L., Pianelli, K., Schaumlöffel, D., Lebrun, M., & Łobiński, R. (2003). Speciation of nickel in a hyperaccumulating plant by high-performance liquid chromatography–inductively coupled plasma mass spectrometry and electrospray ms/ms assisted by cloning using yeast complementation. *Analytical Chemistry*, 75(11), 2740–2745. <https://doi.org/10.1021/ac020704m>

CONCLUSÃO GERAL

A espécie *Handroanthus impetiginosus* mostrou ser resiliente a diferentes doses de Pb (72, 180, 300, 900 mg kg⁻¹) e Ni (30, 70, 100, 130 mg kg⁻¹), sendo capaz de emergir e se desenvolver, sem alterações biométricas significativas. Na dosagem de 300 mg kg⁻¹ de Pb, contudo, percebeu-se o colapso das células externas do córtex da raiz, bem como a ausência de deposição de grânulos de amido.

A respeito do Ni, surpreendentemente, ele influenciou positivamente o conteúdo de pigmentos fotossintéticos (clorofila a, b, totais e carotenoides), com valor máximo obtido na dose de 70 mg kg⁻¹.

H. impetiginosus mostrou um padrão de acúmulo próximos para ambos os metais, concentrando-os no sistema radicular e com translocação limitada à parte aérea da planta. Nas raízes, a ditizona formou sais avermelhados com Pb especialmente próximo à endoderme, nos vasos condutores do cilindro vascular, fibras e, em menor quantidade, na região do córtex. Nas folhas, Pb se limitou à região da nervura central.

Os fatores de bioconcentração superiores a 1 foram observados apenas nas maiores concentrações de Ni (100 e 130 mg kg⁻¹). Esses resultados indicam que *H. impetiginosus* apresenta potencial como espécie fitorremediadora, com destaque para sua aplicação na fitoestabilização de áreas contaminadas por Ni e Pb.

ANEXO 1 – NORMAS DE SUBMISSÃO DA REVISTA (CAPÍTULO 1)

Os manuscritos devem ser enviados on-line em <https://mc04.manuscriptcentral.com/cagro-scielo>

Uma carta de apresentação, assinada por todos os autores, deve ser enviada ao Editor solicitante da publicação. Ela deve conter o nome completo do autor, sem abreviações, e o endereço profissional (instituição, cidade, estado e país). No momento da submissão, esta carta deve ser anexada ao campo "Carta de Apresentação". Qualquer outra inserção, exclusão ou alteração na autoria deve ser acordada por todos os autores (incluindo o autor excluído, se for o caso).

Os manuscritos devem ser escritos em inglês, utilizando as normas ortográficas e gramaticais dos EUA, e editados no programa Microsoft Word para Windows, em papel tamanho A4 (21 cm x 29,7 cm), com espaçamento duplo, utilizando fonte Times New Roman, tamanho 12, com margem de 2,5 cm à esquerda e à direita, e nas margens superior e inferior, título e nota de rodapé. Devem ser organizados em seções da seguinte forma:

a) Título suficientemente claro; conspícuo e completo, sem abreviações e palavras supérfluas, escrito em inglês e português. Recomenda-se iniciar com o termo que representa o aspecto mais importante, com os demais termos em ordem decrescente de importância; a menos que não haja nome comum, os nomes científicos das plantas e animais mais comuns não devem ser utilizados. Não inicie com as palavras “efeito”, “avaliação” ou “influência”.

b) Nome(s) completo(s) do(s) autor(es) sem abreviações no lado direito, com um nome abaixo do primeiro, com seu respectivo número ORCID (Open Researcher and Contributor Identifier) e endereço de trabalho (instituição, departamento, cidade, estado e país).

c) O resumo deve ser escrito continuamente em um parágrafo e não deve exceder 250 palavras. Deve conter uma breve introdução, objetivos e principais resultados; o delineamento estatístico poderá ser mencionado apenas se for o resultado essencial da pesquisa desenvolvida.

d) Termos de indexação com 3 a 5 palavras-chave que expressem o conteúdo do trabalho e diferentes daquelas utilizadas no título, separadas por ponto e vírgula (;).

e) Resumo (resumo traduzido para o português).

- f) Termos para indexação (termos de indexação traduzidos para o português).
- g) Introdução incluindo revisão de literatura e objetivos.
- h) Material e Métodos devem ser combinados e não separados.
- i) Resultados e Discussão devem ser combinados e não separados. Tabelas e figuras devem ser inseridas no texto após a primeira citação.
- j) A(s) conclusão(ões) deve(m) ser escrita(s) continuamente em um parágrafo, declarando o resultado principal da pesquisa e não deve(m) exceder 80 palavras.
- k) Contribuição do Autor descreve o engajamento individual dos autores na pesquisa em termos de Ideia conceitual, Desenho metodológico, Coleta de dados, Análise e interpretação de dados e Redação e edição. Cada um desses tópicos deve ser seguido pelo(s) nome(s) do(s) autor(es) da(s) contribuição(ões) [por exemplo, Ideia conceitual: Arrow, B.; Bartow, JD; Desenho metodológico: Arrow, B.; Brawn, JP; Coleta de dados: Arrow, B.; Análise e interpretação de dados: Brawn, JP; Stanfield, RJ; e Redação e edição: Arrow, B.; Brawn, JP; Stanfield, RJ].
- l) Agradecimento(s) (opcional, porém altamente recomendado) com estilo escrito sério e claro, indicando o(s) motivo(s) do(s) reconhecimento(s).
- m) Referências sem citação de tese, dissertação e/ou resumos.

Qualquer manuscrito enviado que não siga esta organização será automaticamente cancelado.

Tabelas

Deve conter um título claro e conciso, sendo explicativo. As tabelas não devem conter linhas verticais. Linhas horizontais devem separar o título dos dados apresentados e colocá-lo na parte inferior da tabela. As tabelas devem ser elaboradas no Microsoft Word (Tabela - Inserir Tabela), com cada valor inserido em uma única célula, localizada centralmente.

Figuras, imagens, fotos e gráficos, símbolos ou fórmulas

Figuras, imagens, fotos e gráficos podem ser coloridos ou em preto e branco, nítidos e contrastantes, inseridos no texto após a primeira citação e também em arquivo separado (campo Arquivos do Manuscrito), salvos na extensão "TIFF" ou "JPEG" com resolução mínima de 300 dpi. Imagens maiores, que ocupem duas colunas, devem apresentar 1200 pixels de largura. As figuras devem ser descritas em fonte Times New Roman, tamanho 10, sem negrito, sem caixa de texto e dispostas em ordem.

Os símbolos ou fórmulas químicas devem ser apresentados no Microsoft Word para Windows utilizando o software Math Type, mantendo a diagramação original.

Citação no texto

As citações seguem o estilo de citação da American Psychological Association (APA). Todas as citações e suas informações corretas no texto são de responsabilidade do(s) autor(es).

Exemplos de referência mais comuns:

Um autor: Portela (2024) ou (Portela, 2024)

Dois autores: Davis e Jones (2023) ou (Davis & Jones, 2023).

Três autores: Silva, Pazeto & Vieira (2019) ou (Silva, Pazeto & Vieira, 2019).

Mais de três autores: Ribeiro et al. (2022) ou (Ribeiro et al., 2022).

Outras citações no mesmo texto, devem apresentar os autores em ordem alfabética de seus sobrenomes, seguidos da data e separados por ponto e vírgula (;): Araújo (2020); Nunes Junior (2021); Pereira (2023) e Souza (2024).

Referências

As referências seguem o estilo de citação da American Psychological Association (APA). Todas as referências e suas citações corretas no texto são de responsabilidade do(s) autor(es).

Exemplos de referência mais comuns:

Artigos de periódicos

Um autor:

Lopes, MA (2023). Repensando o melhoramento de plantas e os sistemas de sementes na era das mudanças exponenciais. *Ciência e Agrotecnologia*, 47:e0001R23.

Até três autores:

Pinheiro, ACM, Nunes, CA, & Vietoris, V. (2013). Sensomaker: Uma ferramenta para caracterização sensorial de produtos alimentícios. *Ciência e Agrotecnologia*, 37(3):199-201.

Mais de três autores:

Menezes, MD et al. (2013). Abordagem de mapeamento digital de solos baseada em lógica fuzzy e conhecimento de especialistas de campo. *Ciência e Agrotecnologia*, 37(4):287-298.

Manuscrito com eLocation-id:

Braga Junior, RA et al. (2020). Campo magnético na germinação de sementes de café. *Ciência e Agrotecnologia*, 44:e003920.

Livro

Livro completo:

Orton, T. (2019). *Melhoramento de plantas hortícolas*. Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos: Academic Press, 410p.

Capítulo de livro:

Bergen, WG; Merkel, RA (1991). Acreção de proteínas. Em Pearson, AM; Dutson, TR. *Regulação do crescimento em animais de fazenda: Avanços na pesquisa sobre carne*. Londres, Inglaterra: Academic Press, v.7, p.169-202.

Tese e dissertação:

Não devem ser citadas.

Resumos publicados em congressos, simpósios, workshops ou outros eventos científicos:

Não devem ser citados.

Documentos eletrônicos:

Estudos publicados apenas online, sem volume, número, ID de localização, número de página e ano, são referenciados com a adição das informações de endereço eletrônico apresentadas entre (<>) precedidas da expressão "Disponível em:". Não faça referência a materiais eletrônicos de curta duração na web. De acordo com os padrões internacionais, a divisão do endereço eletrônico no final da linha deve ser sempre após a barra (/).

ANEXO 2 – NORMAS DE SUBMISSÃO DA REVISTA (CAPÍTULO 2)

Diretrizes para preparação e submissão de manuscritos

Os manuscritos devem ser submetidos eletronicamente através do site <https://mc04.manuscriptcentral.com/abb-scielo> .

As submissões devem ser feitas exclusivamente em inglês. Os autores são responsáveis por garantir a qualidade da língua inglesa em seus manuscritos. O conselho editorial avaliará a adequação da linguagem no momento da submissão e, se considerada inadequada, o manuscrito poderá ser rejeitado. A partir de 1º de abril de 2024, autores cuja língua materna não seja o inglês deverão, obrigatoriamente, fornecer certificados de revisão por um tradutor científico especializado em língua inglesa, nativo ou não, no momento da aceitação do manuscrito. Esta etapa é obrigatória para aumentar a clareza do conteúdo acadêmico, garantindo que seja totalmente compreensível para editores e revisores de periódicos. O certificado que atesta a proficiência na língua inglesa deve ser submetido no prazo máximo de duas semanas após a aceitação. Os manuscritos aceitos somente serão enviados para edição e posterior publicação após a submissão do certificado de revisão em inglês. É importante ressaltar que a verificação da linguagem não garante a aceitação da publicação. Os autores são responsáveis por cobrir todos os custos associados a tais serviços.

- **Tipos de documentos aceitos**
- Artigos originais
- Artigos de revisão
- Pontos de vista
- Métodos
- Notas Científicas
- **Visão geral do processo de submissão**

A gestão da submissão e avaliação dos manuscritos envolverá o sistema de submissão online de manuscritos <https://mc04.manuscriptcentral.com/abb-scielo> . O texto do manuscrito deverá ser preparado em inglês (consulte PREPARAÇÃO DO ARQUIVO DE ARTIGO abaixo para obter detalhes) e submetido online (<http://mc04.manuscriptcentral.com/abb-scielo>).

Figuras, tabelas e outros tipos de conteúdo devem ser organizados em arquivos separados para submissão (consulte Preparação de Tabelas, Figuras e Material Suplementar abaixo para obter detalhes). Se você estiver usando o sistema de submissão online pela primeira vez, acesse a página de login e gere um nome de usuário e uma senha após clicar no link "Novo Usuário – Cadastre-se Aqui". Se você já estiver cadastrado, mas precisar lembrar seu nome de usuário ou senha, acesse a página de login e insira seu e-mail em "Ajuda com a senha". Nunca crie uma nova conta se já estiver cadastrado.

Caso não consiga acessar nosso sistema de submissão online, entre em contato com o assistente editorial (acta@botanica.org.br).

Carta de Apresentação

Todos os manuscritos devem ser submetidos com uma carta de apresentação, que deve incluir um resumo de aproximadamente 80 palavras sobre os pontos fortes científicos do artigo que os autores acreditam que o qualificam para consideração pela Acta Botanica Brasilica. A carta de apresentação também deve incluir uma declaração de que o manuscrito relata um trabalho inédito e não está sob consideração ativa para publicação em outro periódico, nem foi aceito para publicação, nem foi publicado no todo ou em parte (exceto em forma de resumo).

Caso os autores tenham optado por enviar uma versão pré-impressa do manuscrito, isso deve ser apresentado na carta de apresentação, juntamente com o DOI da pré-impressão.

Preparação do Manuscrito

Todos os manuscritos devem seguir rigorosamente as seguintes diretrizes:

- Use fonte Times New Roman, tamanho 12.
- Espaço duplo entre as linhas.
- As margens devem ter 25 mm de largura.
- Defina o tamanho do papel como A4 (210 x 297 mm).
- Todas as páginas devem ser numeradas sequencialmente.
- Cada linha de texto deve ser numerada, começando pela linha 1 no topo de cada página.

Os formatos de arquivo aceitos são .doc, .docx e .rtf. Arquivos Adobe® PDF (.pdf) não serão aceitos. Quando aplicável, o arquivo do manuscrito deve incluir uma lista de legendas de figuras e cabeçalhos de tabelas ao final. O arquivo do artigo não deve conter ilustrações ou tabelas, que devem ser enviadas em arquivos separados. Todas as tabelas devem ser enviadas em um único arquivo. Não inclua o código do campo.

A primeira página deve indicar o tipo de artigo (Artigos Originais, Artigos de Revisão, Pontos de Vista, Métodos ou Notas Científicas) e fornecer um título completo, conciso e informativo. Os nomes completos de todos os autores devem ser fornecidos, com a afiliação completa, incluindo instituições e o número Orcid de cada autor. Apenas um autor correspondente deve ser indicado com um asterisco e deve ser sempre o autor que submeteu o artigo. O endereço deve ser conciso e em inglês, incluindo instituição, CEP, cidade, estado e país. Não traduza laboratório, departamento e universidade. Títulos e cargos não devem ser mencionados. Essas informações são seguidas pelo endereço de e-mail do autor correspondente.

A segunda página deve conter um Resumo estruturado, com no máximo 200 palavras, em um único parágrafo, sem referências bibliográficas. O Resumo deve delinear o conteúdo essencial

do manuscrito, especialmente os resultados e a discussão, destacando a relevância dos principais achados.

O resumo deve ser seguido por cinco a dez palavras-chave. Observe que palavras essenciais do título devem ser repetidas nas palavras-chave.

Os artigos originais devem ser divididos em seções apresentadas na seguinte ordem:

- Introdução
- Materiais e métodos
- Resultados
- Discussão
- Agradecimentos
- Contribuições dos autores
- Conflito de interesses
- Declaração de disponibilidade de dados
- Referências
- Legendas de tabelas e figuras
- Dados suplementares (se aplicável)

Materiais, métodos e resultados devem ser claros e concisos. A seção Discussão deve evitar repetições extensas dos resultados e deve terminar com algumas conclusões. Esta seção pode, excepcionalmente, ser combinada com os resultados (Resultados e Discussão), mas recomendamos que os autores consultem o Conselho Editorial para uma avaliação preliminar.

Nomes de algas, fungos e/ou plantas devem ser escritos por extenso no resumo e novamente no texto principal para cada organismo na primeira menção, mas o gênero só é necessário para a primeira espécie em uma lista dentro do mesmo gênero (por exemplo, *Hymenaea stigonocarpa* e *H. stilbocarpa*). A autoridade do nome científico (por exemplo, L., Mill., Benth.) é necessária apenas na seção Materiais e Métodos. Use o Índice Internacional de Nomes de Plantas (www.ipni.org) para nomes de plantas corretos. Cultivares ou variedades devem ser adicionados ao nome científico (por exemplo, *Solanum lycopersicum* 'Jumbo').

De acordo com as diretrizes da SciELO Brasil, os autores devem incluir na seção Materiais e Métodos uma referência aos espécimes-voucher ou material de referência, juntamente com seus respectivos números de voucher, para todos os organismos envolvidos ou examinados no estudo. O material de referência deve ser depositado ou armazenado em coleções registradas e acessíveis ao público. A não apresentação dos espécimes-voucher resultará na rejeição do manuscrito. Os espécimes-voucher de quaisquer organismos devem ser depositados

preferencialmente em coleções que compartilhem seus dados por meio do [Global Biodiversity Information Facility](#) (GBIF).

A deposição de sequências de nucleotídeos, incluindo leituras brutas de sequenciamento de alto rendimento, é obrigatória em repositórios como o GenBank (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank>), NCBI SRA – Sequence Read Archive (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/sra>) e/ou outros como o Genome Sequence Archive (GSA – <http://bigd.big.ac.cn/gsa>).

Quando pertinente, os autores devem citar na seção Materiais e Métodos todas as licenças, permissões e autorizações para acesso a recursos genéticos ou conhecimento tradicional associado a recursos genéticos, coleta de material biológico dentro e fora de unidades de conservação, áreas protegidas, terras indígenas, territórios quilombolas e territórios de outros povos e comunidades tradicionais, bem como o registro no Sistema Nacional de Gestão do Patrimônio Genético e do Conhecimento Tradicional Associado (SisGen), no caso de trabalhos com espécies nativas do Brasil. Nos casos aplicáveis, as declarações de aprovação do comitê de ética da instituição responsável pela aprovação da pesquisa devem ser submetidas em arquivo separado no sistema de submissão.

Abreviações devem ser evitadas, exceto em casos comuns (veja edições recentes), e todos os termos, incluindo nomes científicos, devem ser escritos por extenso quando usados para iniciar uma frase. Abreviações não convencionais devem ser explicadas na primeira vez que forem mencionadas.

Unidades de Medida : A Acta Botanica Brasilica adota o Sistema Internacional de Unidades (SI). Para volume, use metros cúbicos (ex.: $1 \times 10^{-5} \text{ m}^3$) ou litros (ex.: 5 μL , 5 mL, 5 L). Para concentrações, use μM , $\mu\text{mol L}^{-1}$ ou mg L^{-1} . Para tamanho e distância, use metros (cm, mm, μm , etc.) e seja consistente em todo o manuscrito.

Números até nove devem ser escritos por extenso, a menos que sejam medidas. Todos os números acima de dez devem ser numerais, a menos que estejam no início de frases.

Para Comunicações Breves, é importante observar que as diretrizes editoriais aplicáveis a artigos originais devem ser rigorosamente seguidas. Em geral, a principal diferença entre artigos originais e notas científicas reside na ausência de subseções no texto e no espaço limitado para ilustrações nestas últimas. Embora seja possível apresentar figuras e tabelas, é importante respeitar o limite de cinco páginas impressas para o manuscrito (material suplementar pode ser incluído, se necessário). Após o resumo (como descrito para artigos originais), o texto deve ser apresentado em uma única seção, sem subtítulos, seguido de agradecimentos e referências bibliográficas.

Citações e Referências

Para citações, o periódico adota um formato bibliográfico adaptado do estilo da American Psychological Association (APA), conforme descrito abaixo. As citações no texto devem seguir o formato de Silva (2012) ou Ribeiro & Furr (1975) ou (Mayer & Wu, 1987a; b; Gonzalez,

2014; Sirano, 2014; Smith *et al.* , 2018) e ser organizadas cronologicamente. Artigos com três ou mais autores, mesmo na primeira menção, devem ser abreviados com o nome do primeiro autor seguido de *et al.*, sempre em itálico (ex.: Simmons *et al.* , 2014). Se dois autores diferentes tiverem o mesmo sobrenome e o artigo tiver o mesmo ano de publicação, indique as iniciais (ex.: JS Santos, 2003). Refira-se aos artigos como 'no prelo' somente se eles tiverem sido aceitos para publicação em um periódico nomeado; caso contrário, utilize o termo “dados não publicados”, indicando as iniciais e o sobrenome da pessoa em questão (ex.: RA Santos, dados não publicados).

As referências devem ser organizadas em ordem alfabética de acordo com o(s) sobrenome(s) do(s) autor(es). Quando o(s) mesmo(s) autor(es) tiver(em) dois ou mais artigos listados, estes devem ser agrupados em ordem de ano. As letras "a", "b", "c", etc., devem ser anexadas à data de trabalhos com a mesma citação no texto. Forneça o DOI de todos os artigos, incluindo aqueles "no prelo" e pré-impresos, sempre que possível.

Nas referências, para artigos com seis autores ou menos, forneça os nomes de todos os autores. Para artigos com sete autores ou mais, forneça apenas os nomes dos seis primeiros autores, seguidos de "et al". A citação do DOI (Digital Object Identifier) é recomendada para todas as referências para as quais esteja disponível.

Por favor, siga os estilos:

Artigos científicos

Com até seis autores

da-Silva CJ, Modolo LV. 2017. Sulfeto de hidrogênio: um novo agente endógeno em um antigo mecanismo de tolerância de plantas à alta salinidade. *Acta Botanica Brasilica* 32(1): 150–160. doi: 10.1590/0102-33062017abb0229

Com sete ou mais autores

Araújo FC, Mendes CN, Souza CR, Miranda KF, Morelli MCM, Coelho PA, *et al.* 2022. Efeitos da fragmentação na diversidade beta de paisagens fragmentadas e conservadas: insights sobre processos de homogeneização e diferenciação. *Acta Botanica Brasilica* 36: e2020abb0261 doi: 10.1590/0102-33062020abb0261

Artigos na imprensa

Alves JJ, Sampaio MTY. 2015. Estrutura e Evolução das Flores. *Acta Botanica Brasilica* (no prelo). doi: 10.1590/0102-33062015abb3339

Livros

Willis KJ, McElwain JC. 2014. *A Evolução das Plantas*. 2ª ed. Nova Iorque, Oxford University Press.

Capítulos de livros

Hopkins MJ, Gerber S. 2017. Disparidade Morfológica. Em: Nuno de la Rosa L, Müller G. (orgs.) *Biologia Evolutiva do Desenvolvimento*. Cham, Springer. Pp. 965–976. doi: 10.1007/978-3-319-33038-9_132-1

Periódicos somente online

Wolkovich EM, Cleland EE. 2014. Nichos fenológicos e o futuro de ecossistemas invadidos pelas mudanças climáticas. *AoB Plants* 6: plu013. doi: 10.1093/aobpla/plu013

Tese (deve ser evitada)

Souza D. 2014. Reguladores de crescimento vegetal. Ph.D. Thesis. Universidade do Brasil, Brasil.

Outras fontes (devem ser evitadas)

Anônimo. 2011. Título do livreto, brochura, relatório, etc. Cidade, Editora ou outra fonte, País.

Sites

Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Available at: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>>. Accessed on 29 Feb 2024

Giacomin LL, Rodrigues GA, Lima KSA, Sousa CVM, Luber J, Afonso EAL, et al. 2022. Lista de espécies de plantas vasculares da Floresta Nacional do Tapajós. In: *Catálogo de Plantas das Unidades de Conservação do Brasil*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Available at <https://catalogo-ucs-brasil.jbrj.gov.br>. Accessed on 29 Feb 2024

Conjunto de dados

[conjunto de dados] Maianne M, Fieker CZ, Dias MM, Reis MG. 2022. Redes beija-flor-planta em campos rupestres e matas ciliares em áreas altitudinais do Parque Nacional da Serra da Canastra, Minas Gerais, Brasil. Disponível em <<https://doi.org/10.48331/scielodata.PHYICG>>, SciELO Data, V1.

Software e pacotes (quando não há nenhum documento associado disponível)

Oksanen J, Simpson G, Blanchet F, Kindt R, Legendre P, Minchin P, et al. 2022. *vegan*: Pacote de Ecologia Comunitária. Pacote R versão 2.6-4. Disponível em <<https://CRAN.R-project.org/package=vegan>>.

Os agradecimentos devem ter, preferencialmente, menos de 80 palavras. Seja conciso: "Agradecemos..." é preferível a "Os autores gostariam de expressar sua gratidão a...". Informações sobre o financiamento devem ser incluídas nesta seção, incluindo nomes dos patrocinadores e números de contrato (se aplicável), juntamente com explicações sobre o papel dessas fontes.

O exemplo a seguir deve ser seguido:

Agradecemos ao Centro de Microscopia (UFMG) pelo fornecimento de equipamentos e suporte técnico para experimentos envolvendo microscopia eletrônica. Agradecemos também a JS Santos pela assistência com as análises estatísticas. Este trabalho foi financiado por uma bolsa de pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (número de identificação).

Contribuição dos autores

Após os agradecimentos, os autores devem incluir uma seção especificando a contribuição de cada autor para o trabalho, seguindo a estrutura de taxonomia das Funções de Contribuidores do CRediT (<https://credit.niso.org/>). A taxonomia é uma estrutura que identifica e define as diferentes funções desempenhadas pelos contribuidores em um projeto, fornecendo uma maneira padronizada de reconhecer suas contribuições. Por exemplo, no contexto de um projeto de pesquisa, alguém que participou principalmente da conceitualização teria concebido a ideia inicial do projeto, delineando seu escopo e objetivos. Enquanto isso, alguém envolvido na coleta e organização de dados seria responsável pela Curadoria de Dados, garantindo a qualidade e a acessibilidade dos dados utilizados. Essas funções, como “Conceitualização” e “Curaçao de Dados”, entre outras listadas, são essenciais para entender quem contribuiu de que maneira para o trabalho realizado. A taxonomia facilita a atribuição de crédito apropriada a cada contribuidor com base em suas responsabilidades específicas ao longo do projeto.

Conflitos de interesse

Os autores devem incluir uma seção no manuscrito declarando a inexistência de conflitos de interesse (pessoais, científicos, comerciais, políticos ou financeiros) no manuscrito submetido. Caso contrário, uma carta deve ser enviada diretamente ao Editor-Chefe.

Material suplementar

Os autores devem fornecer uma lista de todos os materiais suplementares, conforme mostrado abaixo.

O seguinte material online está disponível para este artigo:
Tabela S1 – Lista de Espécies de Plantas e Espécimes-Vale da Flora de Serra Verde, Brasil.

Preparação de Figuras, Tabelas e Material Suplementar

Ativos Digitais

Todas as figuras (fotografias, mapas, desenhos, gráficos, diagramas, etc.) e tabelas devem ser citadas no texto em ordem crescente. As citações de figuras no texto devem aparecer de forma abreviada e em letras maiúsculas (por exemplo, Fig. 1, Fig. 2A-D, Fig. 3A, Figs. 3A, 4C, Tab. 1).

As dimensões máximas das figuras individuais devem ser 170 × 240 mm. A largura de cada componente individual pode ser de 170 mm ou 85 mm, sem exceção, enquanto a altura pode ser ≤ 240 mm. Para imagens em tons contínuos (por exemplo, fotografias), envie arquivos TIFF com 300 dpi. Desenhos mais complexos, como ilustrações botânicas detalhadas, não serão redesenhados e devem ser fornecidos em arquivos TIFF com 600 dpi.

Agrupar gráficos ou imagens relacionados em uma única figura (um painel) é fortemente encorajado. Quando um bloco de material ilustrativo consiste em várias partes, cada parte deve ser rotulada com letras maiúsculas sequenciais na ordem de sua citação no texto (A, B, C, etc.). As letras que identificam imagens individuais devem ser colocadas dentro de círculos brancos no canto inferior direito. Para separar imagens agrupadas, os autores devem inserir molduras brancas (1 mm de espessura). Imagens individuais (não agrupadas em painéis) devem ser identificadas com algarismos arábicos sequenciais na ordem de sua citação no texto (Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3, etc.), apresentadas da mesma maneira, com letras que identificam imagens individuais, como descrito para os painéis acima. O número que identifica uma figura agrupada (por exemplo, Fig. 2) não deve ser inserido no painel, mas referenciado apenas na legenda da figura e no texto (por exemplo, Fig. 2A-C). As barras de escala, quando necessário, devem ser posicionadas no canto inferior direito da figura. As unidades da barra de escala devem ser fornecidas no final da legenda da figura ou, quando uma figura contiver várias barras de escala com unidades diferentes, acima de cada barra. Os detalhes dentro de uma figura podem ser indicados com setas, letras ou símbolos, conforme apropriado.

Devido à nossa política de inclusão para indivíduos daltônicos e com deficiência visual, recomendamos o uso de um mapa de cores perceptualmente uniforme, como *viridis* ou *cividis*; evite o vermelho, especialmente em combinação com o verde; verifique sua figura em escala de cinza ou totalmente desaturada; escolha uma paleta de cores que funcione para todos; use recursos como formas e texturas de linhas para eliminar a ambiguidade de cores.

As tabelas devem ser precedidas por títulos, indicados por algarismos arábicos sequenciais (Tabela 1, 2, 3, etc.; não abrevie). As tabelas devem ser criadas usando a função Tabela do Microsoft Word™. Colunas e linhas devem ser visíveis, embora não devam ser usadas linhas escuras para separá-las. Linhas horizontais devem ser usadas apenas na parte superior (abaixo do título) e inferior (abaixo da última linha) da tabela. Não use preenchimentos, sombreamentos ou cores nas tabelas. Todas as tabelas devem ser enviadas em um único arquivo.

Documentos Suplementares

Quando apropriado, dados suplementares podem ser submetidos como Arquivos Suplementares, que serão publicados online e disponibilizados como links. Isso pode incluir figuras, tabelas ou outros materiais adicionais necessários para documentar completamente a pesquisa contida no artigo ou para facilitar a compreensão do trabalho pelos leitores. Os materiais suplementares são vinculados à página principal do artigo e podem ser citados usando o mesmo DOI do artigo.

Os Materiais Suplementares devem ser fornecidos em formato .doc ou .docx apropriado para texto e tabelas, e em formato .tiff a 300 dpi para figuras e gráficos. O título completo do artigo e os nomes dos autores devem ser incluídos no cabeçalho. Todas as figuras e tabelas suplementares devem ser referenciadas no corpo do manuscrito como "Tabela S1" e/ou "Figura S1".

A Acta Botanica Brasilica pretende manter os arquivos de Materiais Suplementares, mas não garante sua disponibilidade permanente. A revista reserva-se o direito de remover os Materiais Suplementares de um artigo publicado no futuro.

Em consonância com os princípios científicos de abertura, transparência e reprodutibilidade, a Acta Botanica Brasilica incentiva o compartilhamento de todos os conjuntos de dados utilizados na análise, incluindo scripts de análise, outros códigos, métodos e materiais adicionais em repositórios online abertos, como [SciELO Data](#), [Figshare](#) e [OSF](#), caso não possam ser publicados no próprio artigo. Essas informações devem ser indicadas no manuscrito.