

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
*CAMPUS* LAGOA DO SINO  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA  
ENGENHARIA AGRONÔMICA

RAFAEL MIRANDA DE LIMA CARVALHO

**REGULADOR VEGETAL INFLUENCIA O POTENCIAL FITORREMEDIADOR DE METAL  
PESADO EM PLÂNTULAS?**

BURI (SP)  
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
*CAMPUS* LAGOA DO SINO  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA  
ENGENHARIA AGRONÔMICA

RAFAEL MIRANDA DE LIMA CARVALHO

**REGULADOR VEGETAL INFLUENCIA O POTENCIAL  
FITORREMEIADOR DE METAL PESADO EM PLÂNTULAS?**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Agrônômica para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientação: Prof. Dr. Daniel Baron

**BURI (SP)**

**2023**

RAFAEL MIRANDA DE LIMA CARVALHO

REGULADOR VEGETAL INFLUENCIA O POTENCIAL FITORREMEIADOR DE  
METAL PESADO EM PLÂNTULAS?'

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Agrônoma pela  
Universidade Federal de São Carlos.

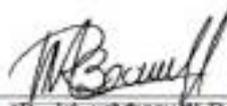
Aprovado em: 30/03/2023.

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** DANIEL BARON  
Data: 30/03/2023 21:28:44 -0300  
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

---

Prof. Dr. Daniel Baron (Orientador)  
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)



---

Dr. Rodrigo Marcolin Boaretto  
Instituto Agronômico de Campinas – Centro de Citricultura Sylvio Moreira (IAC)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** GABRIEL ANTONIO BORTOLOTI  
Data: 30/03/2023 18:45:56 -0300  
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

---

Eng. Agrônomo Gabriel Antônio Bortoloti  
Instituto Agronômico de Campinas – Centro de Citricultura Sylvio Moreira (IAC)

## **DEDICATÓRIA**

A Deus por todo o apoio e acalento nos momentos de fragilidade.

Ao meu pai, José Afonso de Lima Carvalho, meu mestre, por toda força de vida para que eu  
pudesse seguir adiante.

A minha mãe, Sueli Tereza de Miranda Carvalho, meu porto seguro, por cuidar de mim com tanto  
amor e carinho desde o meu primeiro respiro em vida.

A toda a minha família, amigas e amigos.

## **Agradecimentos**

Gostaria primeiramente de agradecer aos meus familiares por todo o apoio nesse ciclo, perante todos os obstáculos, me ajudaram a trilhar o meu caminho da melhor forma, ao meu pai José Afonso de Lima Carvalho, minha mãe Sueli Tereza de Miranda Carvalho, aos meus irmãos Danielle de Miranda Carvalho, Daniel de Miranda Carvalho e Gabriel de Miranda Carvalho que desde que eu era apenas um bebê cuidaram de mim e não mediram esforços para me capacitar a viver o mundo. Cada um pertence de maneira fundamental no meu sistema e em quem eu me tornei. Aos meus amigos mais próximos Luan da Silva Bueno, Tharcio Helmer, Pamela Olivotti Eto, Heloísa Cabral, Samuel Baldin Nogueira, Bruno Murat Marchesin, João Guilherme Pedrosa Meneguetti (Misto), Larissa Gabriel Carnacini Rodrigues (Tomate), Vandeclei Rodrigues (Queque), Nathália Ravanini Fischer e Gabriela Elias de Souza Ravanini, vocês se tornaram parte imensurável de mim e por toda a minha jornada foram imprescindíveis para a minha formação quanto cidadão e humano. Ao meu colega Raja Yamma Rodrigues Souza, por ter dedicado seu tempo e esforço a esse projeto, essa vitória é nossa. Ao meu orientador Daniel Baron por todas as horas exaustivas dedicadas a minha formação, sem medir esforços para passar todo o conhecimento que fosse possível transmitir, ao meu colega de casa Gabriel Antônio Bortoloti, por ter abertas tantas portas para mim e não ter se negado a ajudar em nenhum momento independente da dificuldade. Ao laboratório de fisiologia e nutrição e todos os seus membros (vigentes e egressos), em que no período onde desenvolvi as pesquisas do presente manuscrito, dedicaram suas horas para que eu pudesse sair vitorioso, essa vitória também é parte de vocês. Agradeço a Campina do Monte Alegre por ter sido o meu lar e ter me recebido tão bem ao longo dos 5 anos de graduação, tornou-se o meu lugar preferido. Os meus mais sinceros agradecimentos a toda Universidade Federal de São Carlos Campus Lagoa do Sino (Buri-SP) e aos seus membros por contribuírem em minha formação.

*A paz começa onde cada um de nós pode ser da forma que é*

(Bert Hellinger).

## Resumo

MIRANDA DE LIMA CARVALHO, Rafael. Reguladores vegetais influenciam o potencial fitorremediador de metais pesados em plântulas? 2023. 29f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônoma) – Universidade Federal de São Carlos, Buri, 2023.

O cádmio (Cd) é um mineral considerado como metal pesado (MP) não essencial e disseminado no ambiente por uma série de atividades antropogênicas inadequadas, como a industrialização, urbanização e agricultura realizadas de maneira não planejada. Em plantas, a exposição a Cd é relacionada a uma série de distúrbios morfofisiológicos que incluem necrose em raiz, caule e folhas, além de prejuízos aos processos respiratórios, fotossintéticos, enzimáticos e aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs). A fitorremediação é uma estratégia ecológica que utiliza plantas acumuladoras para estabilizar, transferir ou degradar poluentes ambientais. Contudo, apesar da relevância e importância da fitorremediação no cenário global, a literatura traz resultados antagônicos sobre a interação entre espécies do gênero botânico *Solanum* e compostos que estimulem a fitorremediação, como os reguladores vegetais. Portanto, decidimos abordar essa linha de pesquisa em um experimento prévio de Iniciação Científica e Tecnológica (ICT), o qual resultou em dados experimentais preliminares utilizados para a realização da presente monografia redigida na modalidade científica 'nota científica' (*short communication*). A hipótese de nulidade (H<sub>0</sub>), consistiu no uso do biorregulador não reduzir o potencial fitorremediador de plântulas cultivadas com metal pesado. A hipótese alternativa (H<sub>1</sub>) consistiu no uso do biorregulador reduzir o potencial fitorremediador de plântulas cultivadas com metal pesado. Os dados desse manuscrito elucidaram a capacidade do regulador auxiliar o vegetal em suas defesas a estresses abióticos com respostas antioxidantes, mas não sustentam a hipótese da capacidade de interferir positivamente ou negativamente no potencial fitorremediador.

**Palavras-chave:** EROs; fisiologia vegetal; fitorremediação; iniciação científica e tecnológica; metal pesado.

1 **Abstract**

2 MIRANDA DE LIMA CARVALHO, Rafael. Do plant growth regulator improved the heavy metals  
3 phytoaccumulation potential of accumulating seedlings? 2023. 29f. Course Completion Work  
4 (Degree in Agronomic Engineering) – Universidade Federal de São Carlos, Lagoa do Sino *campus*,  
5 Buri, 2023.

6 Cadmium (Cd) is a mineral considered a non-essential heavy metal (HM) and is widespread in the  
7 environment due to a range of inadequate anthropogenic activities such as industrialization,  
8 urbanization, and unplanned agriculture. In plants, exposure to Cd is associated with a range of  
9 morpho-physiological disorders including necrosis in roots, stems, leaves, as well as impairment of  
10 respiratory, photosynthetic, enzymatic processes, and increased production of reactive oxygen  
11 species (ROS). Phytoremediation is an ecological strategy that uses plants accumulator to stabilize,  
12 transfer, or degrade environmental pollutants. Despite the relevance and importance of  
13 phytoremediation on a global scale, the literature reports conflicting results on the interaction  
14 between botanical genus *Solanum* species and compounds that stimulate phytoremediation, such as  
15 plant growth regulators (PGR). Therefore, we decided to address this research in a previous  
16 Scientific and Technological Initiation (STI) experiment, which resulted in preliminary  
17 experimental data used for the present monograph written in the scientific format 'short  
18 communication'. The null hypothesis (H0) consisted on the use of PGR not reducing the  
19 phytoremediation potential of seedlings cultivated with heavy metal presence. On the other hand,  
20 the alternative hypothesis (H1) consisted on the use of PGR reducing the phytoremediation potential  
21 of seedlings cultivated with heavy metal presence. The data from this manuscript elucidated the  
22 ability of the PGR to promote the plant defense against abiotic stresses with antioxidant responses,  
23 but do not support the hypothesis of the ability to interfere positively or negatively with the  
24 phytoremediation potential.

25 **Keywords:** heavy metal; phytoremediation; plant physiology; ROS; scientific and technological  
26 initiation.

27

28

29

30

31

32 **Sumário**

33 **1. Introdução e justificativa para escolha do tema ..... 1**

34 **2. Objetivos ..... 3**

35 **3. Hipótese..... 3**

36 **4. Metodologia ..... 4**

37 **5. Referências bibliográficas ..... 6**

38 **6. Nota científica (*Short communication*) ..... 7**

39 **Resumo gráfico (*Graphical abstract*) ..... 8**

40 **Destaques (*Highlights*) ..... 8**

41 **Resumo..... 9**

42 **Introdução ..... 10**

43 **Materiais e métodos ..... 10**

44 **Emergência de plântulas ..... 11**

45 **Atividade das enzimas antioxidantes em tecidos vegetais ..... 11**

46 **Resultados e discussão ..... 12**

47 **Emergência de plântulas ..... 12**

48 **Atividade das enzimas antioxidantes em tecidos vegetais ..... 14**

49 **7. Conclusões gerais ..... 17**

50 **8. Referências bibliográficas ..... 18**

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

## 1. Introdução e justificativa para escolha do tema

O cádmio (Cd) é um metal pesado (MP) tóxico liberado no ambiente por meio do descarte incorreto de baterias de níquel-cádmio, fluxo inadequado de biossólidos e aplicação irregular de fitossanitários na agricultura. Ao ser ingerido por seres humanos, esse metal gera efeitos prejudiciais em pulmões, rins e fígado (ROSTAMI; AZHDARPOOR, 2019). Já, em organismos vegetais, o Cd acarreta efeitos tóxicos (3 ppm.g<sup>-1</sup> de matéria seca) por acarretar distúrbios enzimáticos a partir a ação de espécies reativas de oxigênio (EROs), os quais prejudicam diretamente à fixação de CO<sub>2</sub> (ROMERO-PUERTAS et al., 2019; WU et al., 2018).

Em um estudo de Chowardhara e colaboradores (2019) (Chowardhara et al. 2019) estes autores investigaram plantas de *Brassica juncea* L. (Brassicaceae) tratadas com Cd e reportaram diminutas taxas germinativas e decréscimo de 95% no comprimento das plântulas emergidas em relação ao controle, bem como redução de massa de matéria fresca e massa de matéria seca de 89% e 66%, respectivamente. Além disso, no estudo de Wei e colaboradores (2018) (WEI et al., 2018), a espécie *Solanum lycopersicon* L. (planta popularmente conhecida por tomate - Solanaceae) cultivada com Cd apresentou decréscimo na biomassa das raízes, caules e folhas de 72%, 75% e 67%, respectivamente. Nesse mesmo estudo, a concentração de clorofilas e carotenóides totais em *S. lycopersicon* reduziram 41% e 10%, respectivamente, em relação às testemunhas. Desse modo, a presença do Cd nos solos é indesejável e torna-se necessária a utilização de técnicas que possam descontaminá-lo (MAO et al., 2014).

A fitorremediação é uma técnica que consiste em utilizar plantas cultivadas em solos contaminados por poluentes orgânicos e/ou inorgânicos com capacidade acumuladora destes em seus tecidos, a fim de que ocorra a “limpeza” do determinado local. Essa técnica torna-se cada vez mais bem recepcionada pela sociedade consciente como um todo, uma vez que esta técnica é capaz descontaminar o solo de maneira sustentável e permite a retomada da produtividade no mesmo ambiente sem os efeitos nocivos não desejados (ODOH et al., 2019).

Chen e colaboradores (CHEN et al., 2015) avaliaram o potencial fitorremediador da berinjela (*Solanum melongena* L. var. ‘Rita’ no acúmulo de Cd em solo contaminado. Os resultados mostraram que *S. melongena* foi capaz de acumular grandes quantidades de Cd em seus tecidos, reduzindo significativamente a concentração de Cd no solo. O estudo também avaliou a influência de regulador vegetal, na acumulação de Cd. Os

resultados indicaram que o regulador aumentou significativamente a concentração de Cd nas raízes de *S. melongena*, mas não afetou a sua concentração em outras partes da planta. Outro estudo, de Wang e colaboradores (WANG et al., 2018), reporta o potencial de diferentes variedades de *S. melongena* no acúmulo de Cd em solo contaminado. Os resultados mostraram que todas as variedades avaliadas foram capazes de acumular Cd em seus tecidos, mas algumas foram mais eficientes do que outras. Os resultados mostraram que houve aumento na concentração de Cd na raiz e no caule, mas não houve diferença na concentração das folhas. Em conclusão, *S. melongena* apresenta um potencial fitorremediador para o acúmulo de Cd em solos contaminados, podendo ser influenciada pela aplicação de reguladores vegetais.

O metil-jasmonato (MeJA) é um ácido graxo da classe das ciclopentatonas e é relacionado ao estresse vegetal, principalmente por modular os níveis de transcrição gênica envolvidos na tolerância contra condições adversas como herbivoria e danos ocasionados por vento e doenças (FARHANGI-ABRIZ; GHASSEMI-GOLEZANI, 2019; SHILPHA et al., 2015). O uso de MeJA em solanáceas apresenta resultados contraditórios quanto a sua utilização em organismos fitorremediadores (BALI et al., 2019; FARHANGI-ABRIZ; GHASSEMI-GOLEZANI, 2019). Por exemplo, sob concentrações elevadas (1.104 nM) o MeJA é um retardador de crescimento e um promotor de senescência (FAGAN et al., 2015). Todavia, o estudo de Farhangi-Abriz e Ghassemi-Abriz (2019) (FARHANGI-ABRIZ; GHASSEMI-GOLEZANI, 2019) reporta que, em plantas de tomateiro (*S. lycopersicum*), a aplicação de MeJA (100 a 103 nM) exibiu um efeito benéfico sobre a atividade do fotossistema II e pigmentos fotossintéticos sob condições estressantes promovidas por chumbo. Assim, a literatura também reporta evidências científicas em que o uso de biorreguladores em plantas fitorremediadoras são responsáveis por reduzirem a absorção de Cd e/ou torná-las incapazes de tolerarem a toxicidade deste poluente (ROSTAMI; AZHDARPOOR, 2019; SOARES et al., 2020).

O MeJA aplicado sob baixas concentrações (5 nM) inibe o estabelecimento inicial de plantas, bem como reduz a mobilidade de Cd na parte aérea de plântulas e ápice radicular (WANG et al., 2020). Segundo Yan e colaboradores (YAN et al., 2015), a aplicação de diminuta concentração de MeJA (10 nM) reduziu a translocação/acúmulo de Cd na parte aérea de plântulas e ápices radiculares de *Solanum nigrum* L (maria-pretinha) em comparação ao tratamento de 40 mg.dm<sup>-3</sup> Cd sem biorreguladores. Além disso, o Cd diminuiu a atividade de enzimas antioxidantes em limbos foliares (ex.: superóxido dismutase, SOD), todavia, a aplicação de 10 nM de MeJA promoveu a atividade

antioxidante. O MeJA também aumentou o teor de catalase (CAT) nas folhas, entretanto, não apresentou efeito significativo na atividade da peroxidase (POD).

Em suma, especulamos que diferentes concentrações de metil-jasmonato em plantas fitorremediadoras apresentam efeitos contraditórios. Desse modo, optamos por redigir a presente monografia de TCC na modalidade nota científica (*short communication*), a partir do estudo e avaliação de plântulas cultivadas com metal pesado sob influencia de regulador vegetal, fundamentado no que há de mais atual publicado na literatura (*state-of-art*) a respeito das estratégias de fitorremediação de metais pesados.

## **2. Objetivos**

Avaliar o potencial fitorremediador de plântulas hiperacumuladoras cultivadas com metal pesado combinado com a aplicação de biorregulador.

## **3. Hipótese**

H0 = O uso do biorregulador não reduzirá o potencial fitorremediador de plântulas cultivadas com metal pesado.

H1 = O uso do biorregulador reduzirá o potencial fitorremediador de plântulas cultivadas com metal pesado.

#### 4. Metodologia

O levantamento do referencial teórico foi realizado a partir de publicações de periódicos científicos internacionais, com elevado fator de impacto, obtidos por meio da Plataforma CAFe (Comunidade Acadêmica Federada, sítio eletrônico: <http://www.periodicos-capes.gov.br.ez1.periodicos.capes.gov.br/>). As principais bases de dados consultadas foram a Scopus<sup>®</sup> (<https://www.scopus.ez1.periodicos.capes.gov.br/search/form.uri?display=basic#basic>); Science Direct<sup>®</sup> (<https://www.sciencedirect.ez1.periodicos.capes.gov.br/>) e Springer<sup>®</sup> (<https://link.springer-com.ez31.periodicos.capes.gov.br/>). Dessa forma, adotamos a metodologia de Barros e Lehfeld (BARROS; LEHFELD, 1997) ao realizarmos leitura crítica de publicações recentes. Na busca de conteúdos sobre os temas abordados no trabalho, as combinações de 'palavras-chave' mais utilizadas incluem:

- (i) Fitorremediação (*'phytoremediation'*);
- (ii) Metais pesados (*'heavy metals'*);
- (iii) Crescimento vegetativo (*'plant growth'*);
- (iv) Promotores de crescimento vegetal (*'plant growth promoters'*);
- (v) Reguladores de crescimento vegetal (*'plant growth regulators'*);
- (vi) Hiperacumulação (*'hyperaccumulator'*);
- (vii) Estresse oxidativo (*'oxidative stress'*).

## 5. Referências bibliográficas

BALI, S.; JAMWAL, V. L.; KOHLI, S. K.; KAUR, P.; TEJPAL, R.; BHALLA, V.; OHRI, P.; GANDHI, S. G.; BHARDWAJ, R.; AL-HUQAIL, A. A.; SIDDIQUI, M. H.; ALI, H. M.; AHMAD, P. Jasmonic acid application triggers detoxification of lead (Pb) toxicity in tomato through the modifications of secondary metabolites and gene expression. **Chemosphere**, v. 235, p. 734–748, 2019.

CHOWARDHARA, B.; BORGOHAIN, P.; SAHA, B.; AWASTHI, J. P.; MOULICK, D.; PANDA, S. K. Phytotoxicity of Cd and Zn on three popular Indian mustard varieties during germination and early seedling growth. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 21, n. August, p. 101349, 2019.

CHEN, J., YAN, X., LIANG, X., LIU, R., & CAI, Y. Cadmium accumulation in eggplant and its potential for phytoremediation of contaminated soils. **Chemosphere**, 144, 1885-1890, 2016.

FARHANGI-ABRIZ, S.; GHASSEMI-GOLEZANI, K. Jasmonates: Mechanisms and functions in abiotic stress tolerance of plants. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 20, n. June, p. 101210, 2019.

MAO, Q. Q.; GUAN, M. Y.; LU, K. X.; DU, S. T.; FAN, S. K.; YE, Y. Q.; LIN, X. Y.; JIN, C. W. Inhibition of nitrate transporter 1.1-controlled nitrate uptake reduces cadmium uptake in arabidopsis. **Plant Physiology**, v. 166, n. 2, p. 934–944, 2014.

ODOH, C. K.; ZABBEY, N.; SAM, K.; EZE, C. N. Status, progress and challenges of phytoremediation - An African scenario. **Journal of Environmental Management**, v. 237, n. June 2018, p. 365–378, 2019.

ROMERO-PUERTAS, M. C.; TERRÓN-CAMERO, L. C.; PELÁEZ-VICO, M. Á.; OLMEDILLA, A.; SANDALIO, L. M. Reactive oxygen and nitrogen species as key indicators of plant responses to Cd stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 161, p. 107–119, 2019.

ROSTAMI, S.; AZHDARPOOR, A. The application of plant growth regulators to improve phytoremediation of contaminated soils: A review. **Chemosphere**, v. 220, p. 818–827, 2019.

SHILPHA, J.; SATISH, L.; KAVIKKUIL, M.; JOE VIRGIN LARGIA, M.; RAMESH, M. Methyl jasmonate elicits the solasodine production and anti-oxidant activity in hairy root cultures of *Solanum trilobatum* L. **Industrial Crops and Products**, v. 71, p. 54–64, 2015.

SOARES, T. F. S. N.; DIAS, D. C. F. dos S.; OLIVEIRA, A. M. S.; RIBEIRO, D. M.; DIAS, L. A. dos S. Exogenous brassinosteroids increase lead stress tolerance in seed germination and seedling growth of *Brassica juncea* L. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 193, n. January, p. 110296, 2020.

WANG, L., LIU, X., WEI, Y., WANG, X., ZHOU, Q., & HUANG, X. Screening and evaluation of eggplant varieties for cadmium accumulation and the potential of using plant growth regulators to enhance its phytoremediation. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 165, 301-308, 2018

WANG, Z.; LIU, L.; SU, H.; GUO, L.; ZHANG, J.; LI, Y.; XU, J.; ZHANG, X.; GUO, Y. D.; ZHANG, N. Jasmonate and aluminum crosstalk in tomato: Identification and expression analysis of WRKYs and ALMTs during JA/Al-regulated root growth. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 154, p. 409–418, 2020.

WEI, T.; LV, X.; JIA, H. L.; HUA, L.; XU, H. H.; ZHOU, R.; ZHAO, J.; REN, X. H.; GUO, J. K. Effects of salicylic acid, Fe (II) and plant growth-promoting bacteria on Cd accumulation and toxicity alleviation of *C. Journal of Environmental Management*, v. 214, p. 164–171, 2018.

WU, W.; WU, Y.; WU, J.; LIU, X.; CHEN, X.; CAI, X.; YU, S. Regional risk assessment of trace elements in farmland soils associated with improper e-waste recycling activities in Southern China. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 192, n. October 2016, p. 112–119, 2018.

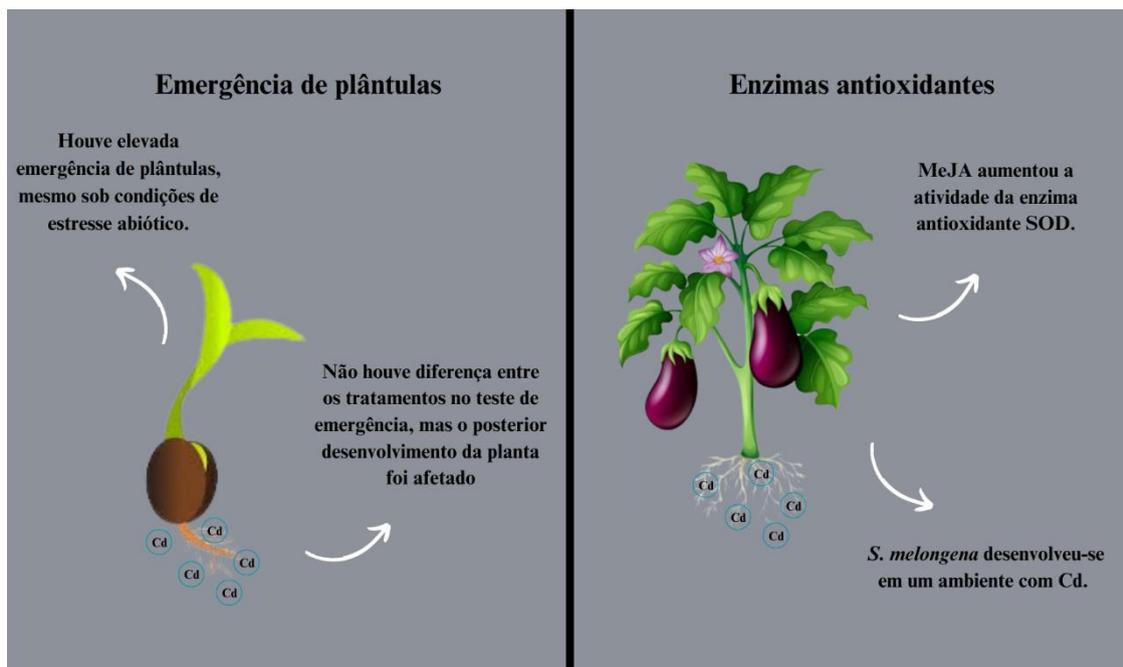
YAN, Z.; ZHANG, W.; CHEN, J.; LI, X. Methyl jasmonate alleviates cadmium toxicity in *Solanum nigrum* by regulating metal uptake and antioxidative capacity. **Biologia Plantarum**, v. 59, n. 2, p. 373–381, 2015.

## 6. Nota científica (*Short communication*)

Conforme estabelecido pelo Projeto Pedagógico do Curso de Bacharelado em Engenharia Agrônômica (PPC, 2016 – *link* de acesso: [https://www.lagoadosino.ufscar.br/cursos/arquivos/ppcs/ppc\\_engenharia\\_agronomica\\_2018\\_07.pdf/view](https://www.lagoadosino.ufscar.br/cursos/arquivos/ppcs/ppc_engenharia_agronomica_2018_07.pdf/view)), no item ‘9.4.2. Regulamento do Trabalho de Conclusão de Curso’, estabelece que a monografia do trabalho de conclusão do curso se refere a: “[...] um trabalho acadêmico pode ser monográfico ou de pesquisa o qual poderá ter tema inédito ou advir de pesquisa realizada pelo estudante, no âmbito de sua iniciação científica ou elaborar uma monografia a partir de situações-problema que por ventura vivencie no campo de estágio”.

Considerando as justificativas apresentadas anteriormente ao longo desta monografia, redigimos o presente TCC na modalidade ‘*short communication*’ com os atuais avanços intelectuais, conforme as normas de publicação da revista de alto impacto ‘Science of The Total Environment’ (STOTEN) (<https://www.sciencedirect.com/journal/science-of-the-total-environment>).

## Resumo gráfico (*Graphical abstract*)



## Destaques (*Highlights*)

- EROs não interferiram na emergência de *S. melongena*;
- Cd ocasionou necrose e amarelecimento de folhas no teste de emergência;
- A atividade da SOD em folhas jovens foi maior nos tratamentos com 10000 nM de MeJA;
- As atividades de CAT e SOD não diferiram entre os tratamentos.

## Resumo

O cádmio (Cd) é um mineral considerado como metal pesado (MP) tóxico de ocorrência natural, entretanto, ações antropogênicas o tornam presente em todo o ambiente. Esse metal pode acarretar efeitos deletérios no metabolismo vegetal a partir do aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs). A fitorremediação é uma opção ecologicamente viável na descontaminação desse metal no ambiente. Os resultados na literatura são contrastantes quanto à aplicação de reguladores vegetais em plantas para aumentar a capacidade da planta a se desenvolver em locais contaminados com metais pesados. A fim de avaliar o potencial fitorremediador a esses metais, torna-se necessário avaliar o vegetal desde a emergência das sementes até os estágios iniciais de seu desenvolvimento. Os resultados dessa comunicação trazem à tona que o Cd induziu as sementes de (*Solanum melongena* L. var. 'Rita') à dormência, além de acarretar necrose e amarelamento das folhas no teste de emergência. O MeJa promoveu a capacidade do vegetal de se desenvolver sob estresses abióticos elevando a atividade da enzima superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1) ( $p < 0.05$ ) independente da presença de Cd, enquanto as enzimas catalase (CAT, EC 1.11.1.6) e peroxidase (POD, EC 1.11.1.7) não diferiram entre os tratamentos ( $p > 0.05$ ). Os resultados indicam que a espécie vegetal *S. melongena* apresentou aumento da atividade de SOD com a aplicação do tratamento de 10000 nM de MeJa. Diante disso, nossos achados permitem especularmos sobre estudos adicionais necessários relacionados a interação do MeJa à vias metabólicas específicas para que *S. melongena* possa ter sua capacidade fitorremediadora elevada.

**Palavras-chave:** cádmio; emergência de plântulas; enzimas antioxidantes; ERO's; fitorremediação.

## 1. Introdução

O cádmio (Cd) é um metal pesado (MP) de ocorrência natural encontrado na forma de carbonato de cádmio ( $\text{CdCO}_3$ ) e disseminado no ambiente por uma série de atividades antropogênicas inadequadas, tais como industrialização, urbanização e agricultura conduzidas de maneira não planejada (SHEN et al., 2021). Em plantas, a exposição a Cd é relacionada ao surgimento a uma série de distúrbios morfofisiológicos que incluem necrose foliar, apodrecimento radicular, além de prejuízos aos processos respiratórios, fotossintéticos, enzimáticos e aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) e, por isso, são necessários métodos de remediação desse problema ambiental e social (WU et al., 2018; ZHENG et al., 2021).

A fitorremediação é uma biotecnologia reportada como ecologicamente correta, a qual pode ser implementada em larga escala e a baixo custo, quando comparada a outros métodos não biológicos de remediação (BORTOLOTTI; BARON, 2022). Diferentes estudos exploram o estímulo de biorreguladores na fitorremediação de MPs. O MeJa é um regulador vegetal relacionado diretamente a tolerância do estresse no vegetal, o qual interfere nos tecidos de armazenamento, crescimento das raízes, fertilidade e reprodução. Além disso, pode ser aplicado exógenamente com o intuito de obter um efeito benéfico no sistema fotossintético dos vegetais e aumentar suas taxas de germinação e crescimento inicial. Contudo, seu uso em solanáceas apresenta resultados contraditórios quanto à sua utilização em organismos fitorremediadores, afinal, concentrações elevadas (1.104 nM) acarretam em retardo no crescimento vegetal. Por exemplo, em plantas de tomateiro (*S. lycopersicum*) houve efeito benéfico no aparato fotossintético em condições de estresse por chumbo (Pb). Além do mais, a literatura também reporta que biorreguladores em plantas fitorremediadoras são responsáveis por reduzirem a absorção de Cd e/ou torná-las incapazes de tolerarem a toxicidade deste poluente na concentração de 100 a 103 nM (BALI et al., 2019; FARHANGI-ABRIZ; GHASSEMI-GOLEZANI, 2019).

A espécie vegetal *S. melongena* apresenta características que a tornam uma planta tolerante a estresses abióticos, tais como, sua alta capacidade em fitoextrair MP's do solo. Afinal, a literatura aponta estudos que contrastam os locais de armazenamento desse poluente sob influencia de biorregulador, com efeitos diretos no índice de velocidade de emergência de plântulas e seu crescimento inicial (GOGOI; KALITA, 2015). A literatura também reporta que o potencial fitorremediador de plântulas pode ser avaliado a partir do estabelecimento inicial de plântulas e com a quantificação da atividade enzimática presente em folhas jovens (YAN et al. 2015; ALI et al., 2018; KAUSHIK et al., 2022).

Desse modo, nosso objetivo foi avaliar a tolerância de plântulas cultivadas com a presença de metal pesado combinado com regulador vegetal.

## 2. Materiais e métodos

A condução experimental foi realizada em ambiente controlado com fotoperíodo de 16 horas de luz e temperatura de 23°C ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ), alternada com temperatura de 18°C ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) durante o período não-luminoso, com umidade relativa do ar em torno de 60% ( $\pm 5\%$ ). As sementes de *S. melongena* foram fitossanitizadas em álcool etílico 70% por 30 segundos, seguidas de imersão em hipoclorito de sódio 1% (m/V) por 8 minutos e posterior enxágue com água destilada (XU; YIN; LI, 2009). Em seguida, receberam a dose de regulador vegetal metil-jasmonato (MeJa) via embebição (aplicação seminífera) nas concentrações de 0,0 (controle), 5, 100, 1000 e 10000 nM, por 4 horas (BALI *et al.*, 2019). A aplicação do metal pesado Cd foi realizada na forma de CdCl<sub>2</sub> a 1,0 mM ('C1') e de água destilada sem a presença de Cd ('C2'[controle]). Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial duplo (2X5), ao considerar como fatores, a ausência e presença do metal pesado Cd, bem como as diferentes concentrações de MeJa.

### 2.1. Emergência de plântulas

A análise da emergência de plântulas foi delineada em blocos casualizados (DBC), no qual posicionamos as sementes entre duas folhas de papel *germitest*<sup>®</sup> umedecidas com "C1" e "C2" na proporção de 2,5 vezes em mL a massa do papel em g (gramas), conforme metodologia de Anuradha; Rao (2007). Durante os 7 dias após a semeadura (DAS), realizamos as contagens de plântulas emergidas conforme metodologia de Austruy e colaboradores (AUSTRUY *et al.*, 2013).

A análise de emergência de plântulas foi realizada com o cálculo da porcentagem de emergência (EP), o tempo médio de emergência (TME) e o índice de velocidade de emergência (IVE) a partir dos dados coletados durante 7 DAS com a aplicação das seguintes fórmulas:

$$EP(\%) = \left( \frac{N}{Nt} \right) \times 100$$

N – Total de plântulas emergidas

Nt – Total de plântulas utilizadas

$$TME \text{ (dias)} = \frac{(\sum N \times T)}{\sum N}$$

N – Plântulas emergidas por dia

T – Contagem dos dias

$$IVE = \sum(N/T)$$

Aos 7 DAS, realizamos o teste de tetrazólio nas sementes que não apresentaram protusão de radícula. Pré-condicionamos as sementes à 45°C e as imergimos em uma solução de cloreto de 2,3,5 trifenil tetrazólio 0,075% (C<sub>19</sub>H<sub>15</sub>ClN<sub>4</sub>), durante 1 hora. Na sequência, as sementes foram

seccionadas longitudinalmente e observadas em estereomicroscópio. Avaliamos o índice de mortalidade e de dormência das sementes, em que consideramos na avaliação a coloração avermelhada ou branca/amarelada pela extensão do endosperma e do embrião (SANTOS et al., 2007).

## **2.2. Atividade de enzimas antioxidantes em tecido vegetal**

A atividade enzimática de plantas jovens ocorreu em condições idênticas de temperatura e luminosidade à etapa anterior, entretanto, o delineamento dessa etapa foi inteiramente casualizado (DIC). Realizamos a semeadura em bandejas de germinação preenchidas com substrato composto por vermiculita textura média e perlita (2:1) (SOARES et al., 2016). A avaliação da atividade das enzimas antioxidantes foi realizada aos 21 DAS, momento no qual coletamos as folhas para o preparo do extrato enzimático, seguindo a metodologia proposta por Kar e Mishra (1976) pulverizando as folhas coletadas em almofariz gelado na presença de nitrogênio líquido, com posterior centrifugação a 10000 x g e coleta do sobrenadante. A partir desse extrato determinamos a atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1) (PEIXOTO et al, 1999), catalase (CAT, EC 1.11.1.6) (PEIXOTO et al, 1999) e peroxidase total (POD, EC 1.11.1.7) (TEISSEIRE e GUY, 2000) em espectrofotômetro nos comprimentos de onda 560, 240 e 430 nm respectivamente. Os dados obtidos foram submetidos à análise variância (ANOVA), com o auxílio do *software* estatístico R, e, em caso de significativos ( $p < 0,05$ ), as médias dos tratamentos foram comparadas utilizando o teste de Tukey  $\alpha=5\%$ .

## **3. Resultados e discussão**

### **3.1. Emergência de plântulas**

O presente estudo indica que não houve diferença estatística ( $p > 0.05$ ) para as variáveis TME, IVE e EP (%) (Tab. 1). Entretanto, observamos alterações visuais entre os tratamentos (Fig. 1). Os estudos de Barbosa et al. (2018) e Hassan et al. (2020) corroboram nossos resultados, em que houve diferença visual como necrose, amarelamento em folhas e menor tamanho entre os tratamentos. As plantas podem apresentar tolerância à presença do metal Cd, o que significa que as mesmas podem continuar a crescer mesmo sob condições de estresse.

Table 1 – Porcentagem de emergência (EP), tempo médio de emergência (TME) e índice de velocidade de emergência (IVE) de plântulas da espécie de *Solanum melongena* L, com 0 nM, 5 nM, 100 nM, 1000 nM, e 10000 nM em ausência ou presença de Cd ( $p > 0.05$ ).

Com Cd (1 mM)				Sem Cd (0 mM)			
MeJA (nM)	EP $n=3$ (%) SE = 1.43	TME $n=3$ (dias) SE = 0.0699	IVE $n=3$ SE = 0.077	MeJA (nM)	$n=3$ (%) SE = 1.43	TME $n=3$ (dias) SE = 0.0699	IVE $n=3$ SE = 0.077
0	97.7	4.87	3.87	0	95.3	4.68	3.97
5	96.5	4.78	3.90	5	97.7	4.63	4.11
100	94.7	4.86	3.77	100	90.1	4.68	3.76
1000	94.2	4.83	3.76	1000	95.9	4.76	3.92
10000	96.5	4.85	3.84	10000	97.7	4.67	4.06

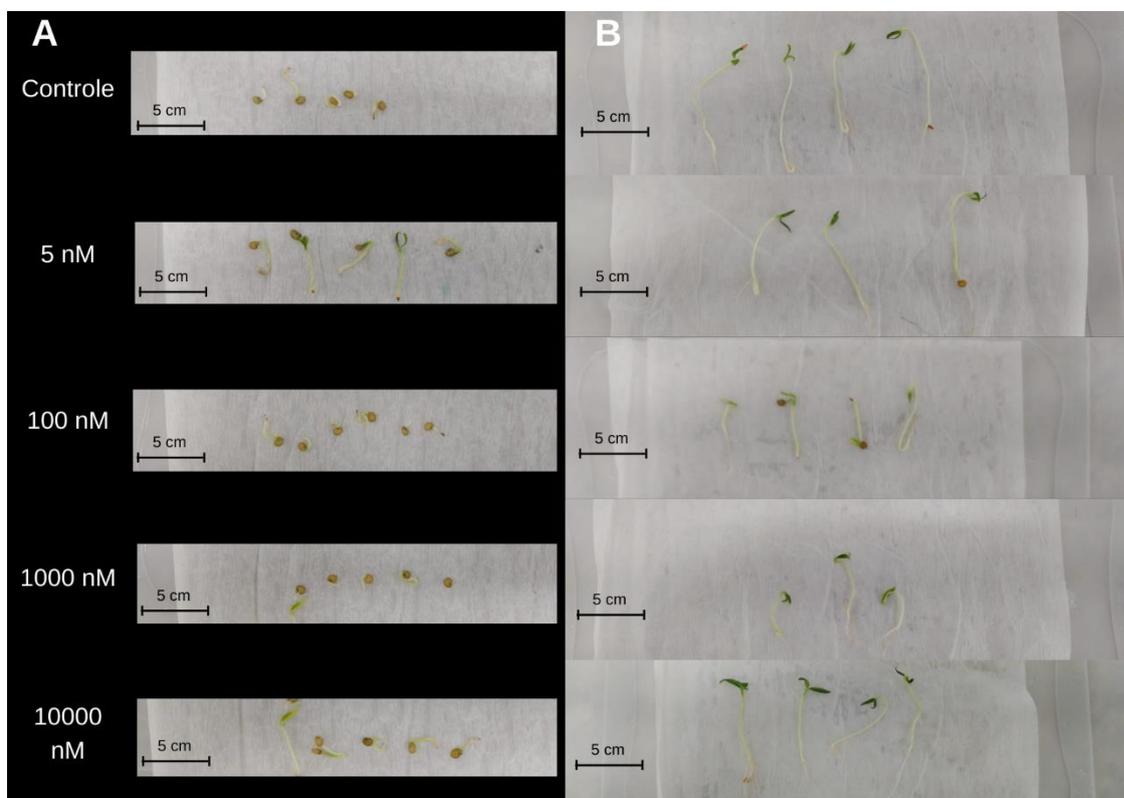


Fig. 1. Diferença visual (tamanho, necrose e amarelecimento de folhas) entre os tratamentos com Cd (A) e sem Cd (B) em 0 [controle], 5, 100, 1000, e 10000 nM de MeJA em plântulas de *S. melongena* no 7 DAS.

O teste de tetrazólio é uma técnica comumente utilizada para avaliar a qualidade das sementes ao identificar dormência e mortalidade (OLIVEIRA et al., 2019; AL-ASKAR et al., 2018). Os resultados evidenciam que a exposição ao Cd aumentou a dormência. Dentre as sementes cultivadas em 1mM de Cd que não apresentaram protrusão da radícula (36 indivíduos), apenas 3 indivíduos não apresentavam atividade respiratória, enquanto que as sementes cultivadas em 0 mM de Cd que não apresentaram protrusão da radícula (41 indivíduos), 14 indivíduos não apresentaram atividade respiratória (Fig. 2). A dormência das sementes é um mecanismo de proteção que impede a germinação em condições ambientais inadequadas, como temperaturas baixas ou altas, falta de umidade e presença de substâncias tóxicas (DONOHUE et al., 2010).

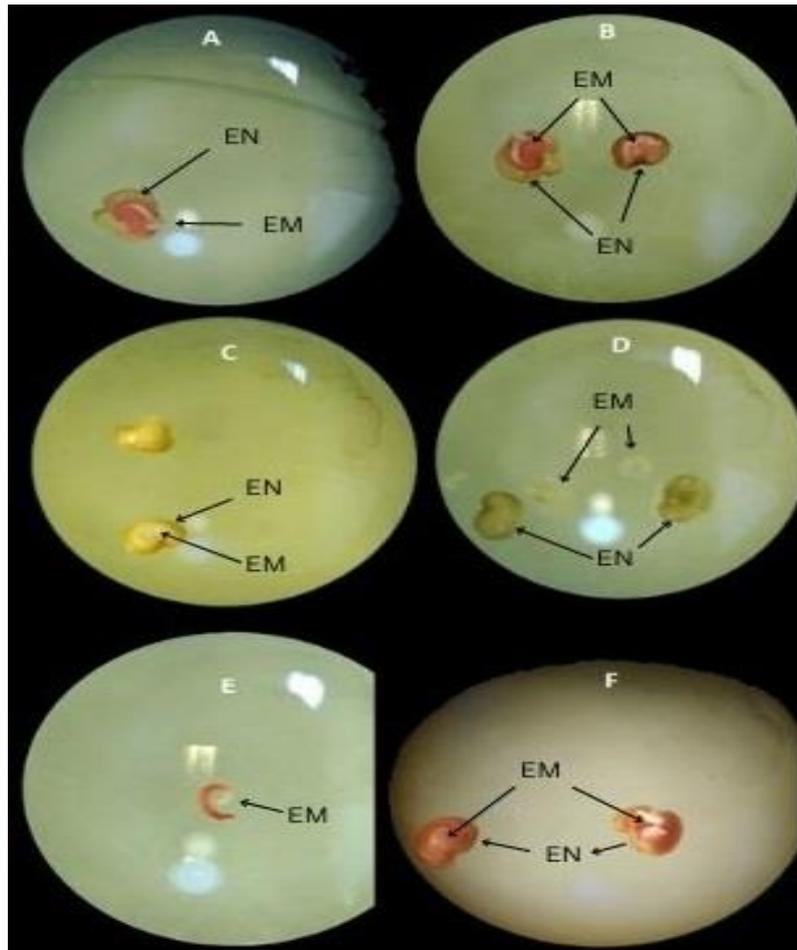


Fig. 2. Secções transversais de sementes de *S. melongena* submetidas ao teste de tetrazólio aos 7 DAS. O tecido corado em vermelho indica que o mesmo apresenta respiração celular. Já o tecido não corado indica a mortalidade. EM = embrião e EN = endosperma.

### 3.2. Atividade das enzimas antioxidantes em tecidos vegetais

A atividade enzimática pode ser aumentada em resposta ao estresse oxidativo, contribuindo para a tolerância das células vegetais a diferentes fatores abióticos (BARON, 2015; AMARO, 2020; SINGH, 2020; MITTLER, 2020; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, 2021; HUSSAIN, 2021). O metil jasmonato (MeJa) é um composto orgânico que faz parte do grupo dos jasmonatos com função sinalizadora intracelular que ativa componentes antioxidantes, tais como, ácido ascórbico, glutathiona, flavonoides, entre outras. Essas componentes fisiológicos são importantes para a produção e acumulação de antioxidantes, que podem neutralizar EROs geradas em plantas sobre estresse abiótico. Outra via metabólica em que o MeJa pode atuar é a de absorção de MP, logo, esse pode induzir a expressão de transportadores integrais de membrana, como as proteínas do tipo ABC (*ATP-binding cassette*), que transportam MP para fora da célula, reduzindo a sua acumulação tóxica dentro da planta (GUPTA, 2019; HUSSAIN et al., 2021). A SOD está presente em diferentes isoformas e organelas celulares, incluindo cloroplastos, mitocôndrias e peroxissomos, de modo que a sua atividade é afetada pela presença de Cd (MITTLER, 2017). No presente estudo, a atividade enzimática da SOD variou em função do MeJa ( $p < 0.05$ ) em que, ao analisarmos os efeitos simples deste fator, as maiores atividades ocorreram no tratamento com 10000 nM, independente da

presença e ausência do Cd (8.01 U.mg<sup>-1</sup> prot e 8.99 U.mg<sup>-1</sup> prot, respectivamente) (Fig. 1). A maior atividade da SOD aconteceu no tratamento com 10000 nM de MeJa e isso pode ter contribuído com a redução do estresse oxidativo, afinal, a mesma oxida e reduz o ânion superóxido (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) à peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) e oxigênio molecular (O<sub>2</sub>) (ZHANG et al., 2020). De todo modo, não está clara qual via metabólica o MeJa está associado quando aplicado exógenamente em *S. melongena*. As diferenças das atividades de SOD entre os tratamentos indicam sua influência na neutralização das EROs, mas não indicam se foi por influência nas proteínas ABC ou nas vias de defesa antioxidante.

A CAT está presente na grande maioria das células de diferentes órgãos vegetais, o que inclui às raízes, caules e folhas. Essa enzima está presente em várias organelas celulares, incluindo os peroxissomos e pode ser influenciada por sua interação com algumas vias bioquímicas, tais como, a do ciclo do ácido cítrico e do aparato fotossintético (WILLEKENS et al., 1997). Já a POD é encontrada em diferentes compartimentos celulares, incluindo o citoplasma, a parede celular e os cloroplastos. Alguns estudos sugerem que a regulação da atividade da POD pode estar associada à via bioquímica do ácido salicílico (SA), a qual está envolvida na resposta de defesa de plantas contra patógenos e estresses abióticos (XU et al., 2015). No entanto, as atividades enzimáticas de CAT e da POD (Fig. 3) não diferiram entre os tratamentos ( $p > 0.05$ ). A literatura tem reportado resultados conflitantes sobre a atividade da CAT e da POD em plântulas de *S. melongena* cultivadas com Cd. Alguns desses resultados relatam que a atividade dessas enzimas aumenta em resposta ao estresse ao Cd, enquanto outros estudos não reportam diferenças (FAHAD et al., 2015). Alguns estudos relatam que não há diferença na atividade da CAT em distintas condições de estresse (DUTTA et al., 2021; BRAGA et al., 2022; SAXENA et al., 2020). Embora a atividade da POD possa variar em função das variações ambientais e fisiológicas, alguns autores sugerem que sua regulação e interação com vias bioquímicas específicas podem, ou não, apresentar diferenças significativas (XU et al., 2015; SOARES et al., 2019).

### 3.3. Conclusões gerais

O MeJa aumentou a atividade de SOD em folhas jovens de *S. melongena* e isso indica aumento da capacidade de desenvolvimento da planta frente ao estresse, todavia, não foi possível evidenciar seu potencial fitorremediador. Assim, abre-se a possibilidade de futuros estudos investigativos que relacionem o MeJa e as vias metabólicas específicas associadas entre si, que atuam para que *S. melongena* apresente ganhos em sua sua capacidade fitorremediadora. A regulação e a interação entre CAT e POD não apresentam diferenças significativas relacionadas aos tratamento de MeJa. A dormência de sementes, reportada em nosso teste de tetrazólio, pode ser um mecanismo de adaptação para evitar a germinação em condições ambientais desfavoráveis acarretadas por poluentes inorgânicos.

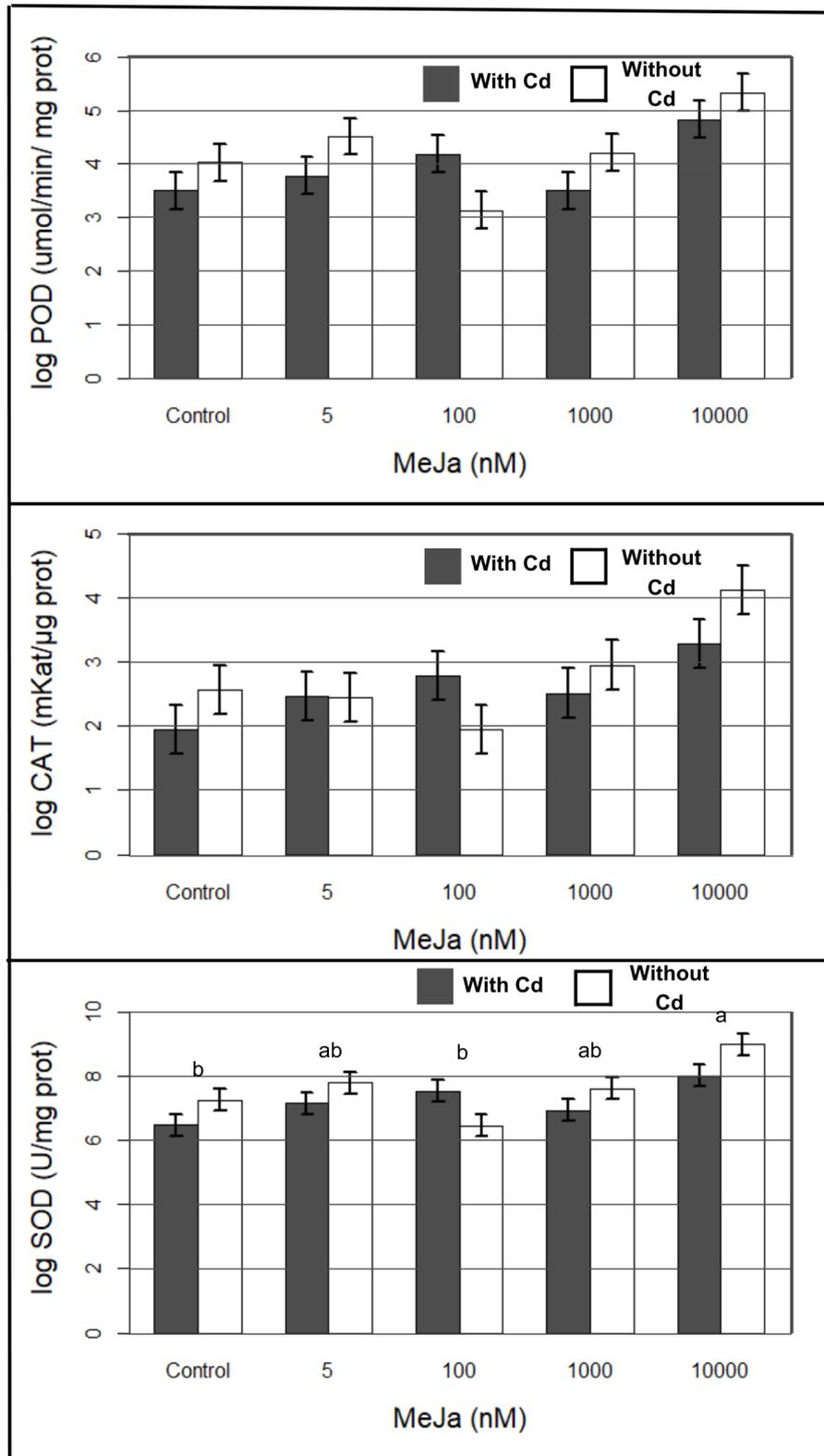


Fig. 3. Atividade das enzimas POD, CAT e SOD em *S. melongena* nos diferentes tratamentos de MeJa. Letras diferentes nas colunas indicam diferença significativa entre as dosagens de MeJa, independente da presença ou ausência de Cd ( $p = 0.05$  entre as médias)

## Referências bibliográficas

- AL-ASKAR, A. A., RASHAD, Y. M., OTHMAN, Y. Effects of lead toxicity on seed germination and seedling growth in maize (*Zea mays* L.) and evaluation of biochemical changes under lead stress using SDS-PAGE analysis. **Journal of King Saud University-Science**, v. 30, n. 1, p. 40-47, 2018.
- ALI, E. et al. Role of jasmonic acid in improving tolerance of rapeseed (*Brassica napus* L.) to Cd toxicity. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE B**, v. 19, n. 2, p. 130, 2018.
- AMARO, A. The role of antioxidant enzymes in the prevention of oxidative stress in plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 24, 2020.
- ANURADHA, A.; RAO, S. S. R. The effect of brassinosteroids on radish (*Raphanus sativus* L.) seedlings growing under cadmium stress. **Plant, Soil and Environment**, v. 53, n. 11, p. 465, 2007.
- ALTMAN, D. G. Practical statistics for medical research. London: **Chapman and Hall**, 1991.
- AUSTRUY, A. et al. Physiological impacts of soil pollution and arsenic uptake in three plant species: *Agrostis capillaris*, *Solanum nigrum* and *Vicia faba*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 90, p. 28–34, 2013.
- BALI, S. et al. Jasmonic acid application triggers detoxification of lead (Pb) toxicity in tomato through the modifications of secondary metabolites and gene expression. **Chemosphere**, v. 235, p. 734–748. 2019.
- BARBOSA, J. P. R. et al. Emergence and initial growth of bean seedlings under zinc stress. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, p. 213-220, 2018.
- BARON, D. The role of antioxidant enzymes in plants under abiotic stress. In *Abiotic Stress Response in Plants*, p. 137-153. **Springer**, Cham, 2015.
- BORTOLOTTI, G. A.; BARON, D. Phytoremediation of toxic heavy metals by brassica plants: A biochemical and physiological approach. **Environmental Advances**, v. 8, p. 100204, 2022.
- BRAGA, M. A. et al. Physiological and biochemical responses of castor bean seedlings under saline stress. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 3944-3957, 2022.
- CHEN, X. et al. Cadmium enhances the germination of *Brassica chinensis* seeds via promoting water uptake and nutrient mobilization. **Environmental science and pollution research international**, p. 26234-26242, 2018.
- DONOHUE, Kathleen et al. Germination, postgermination adaptation, and species ecological ranges. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, v. 41, p. 293-319, 2010.
- DUTTA, S. et al. Biochemical and physiological responses of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants to lead stress. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 3033-3047, 2021.
- FAHAD, S., et al. Cadmium toxicity in cotton seedlings: growth, leaf pigment contents, photosynthesis, antioxidative enzymes, and ATPase activity. **Water, Air, & Soil Pollution**, p. 377, 2015.

GOGOI, N.; KALITA, P. Metal accumulation in solanum melongena L. grown in cadmium contaminated soil. **Journal of Environmental Biology**, p. 1123-1127, 2015

GUPTA, D. K. et al. Jasmonates: emerging players in controlling metal homeostasis in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 395, 2019.

HASSAN, M. J. et al. Response of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars to lead (Pb) stress. **Journal of Plant Nutrition**, p. 2268-2278, 2020.

HUSSAIN, M. et al. Jasmonates: the role players in abiotic stress tolerance of plants. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 19803-19816, 2016.

HUSSAIN, S.; HUANG, J.; KHAN, F. Reactive Oxygen Species and Their Role in Plants Under Abiotic Stress. p. 295, 2021.

JIANG, Y.; HUANG, B. ROS signaling in plants under low oxygen stress. **Journal of Experimental Botany**, p. 17-25, 2021.

JIAO, W. et al. Nickel exposure-induced oxidative stress and growth inhibition in alfalfa are associated with inhibition of superoxide dismutase. **Chemosphere**, v. 286, p. 131762, 2020.

KAR, M.; MISHRA, D. Catalase, peroxidase, and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. **Plant physiology**, v. 57, n. 2, p. 315–319, 1976.

KAUSHIK, S. et al. Seed priming with methyl jasmonate mitigates copper and cadmium toxicity by modifying biochemical attributes and antioxidants in *Cajanus cajan*. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 29, n. 2, p. 721–729, 2022.

LIU, Y. et al. Effects of cadmium stress on seed germination and seedling growth of *Solanum melongena* L. **Journal of Applied Ecology**, p. 794-800, 2019.

MOUSAVI, S. R., & ASGARI-LAJAYER, H. Toxic effects of cadmium on plants: A review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 189, p. 109959, 2020.

MITTLER, R. ROS are good. **Trends in Plant Science**, v. 22 n. 1, p. 11-19, 2017.

MITTLER, Ron; BLUMWALD, Eduardo. The roles of ROS and ABA in systemic acquired acclimation. **The Plant Cell**, v. 27, n. 1, p. 64-70, 2015.

OLIVEIRA, R. S. et al. Germination, vigor and tetrazolium test of bean seeds exposed to cadmium and zinc. **African Journal of Agricultural Research**, v. 14, 47-53, 2019.

PEIXOTO, H.P.P.; CAMBRAIA, J.; SANT'ANA, R.; MOSQUIM, P.R.; MOREIRA, A.M.; Aluminium effects on lipid peroxidation and the activities of enzymes of oxidative metabolism in sorghum. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 11, n. 3, p.137-143, 1999.

SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, E., RUBIO-WILHELMI, M. M., & BLASCO, B. Abiotic Stress Responses in Plants: Mechanisms and Adaptations. In *Abiotic Stress Responses in Plants* p. 1-21. **Springer**, Cham, 2021.

SANTOS, M. A. O.; NOVEMBRE, A.; MARCOS-FILHO, J. Tetrazolium test to assess viability and vigour of tomato seeds. **Seed Science and Technology**, v. 35, n. 1, p. 213–223, 2007.

SAXENA, J., CHAKRABARTY, D., & DUBEY, R. S. Antioxidative defense system and proline metabolism in water hyacinth [*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms] in response to mercury toxicity. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 13, p. 15023-15036, 2020.

SHEN, X. et al. A critical review on the phytoremediation of heavy metals from environment: Performance and challenges. **Chemosphere**, p. 132979, 2021.

SOARES, C. et al. Effect of 24-epibrassinolide on ROS content, antioxidant system, lipid peroxidation and Ni uptake in *Solanum nigrum* L. under Ni stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 122, p. 115–125, 2016.

SINGH, R. K., & SINGH, P. Reactive Oxygen Species: Role in Abiotic Stress Tolerance in Plants. In *Oxidative Damage to Plants* p. 67-88. **Springer**, Singapore, 2020.

SOARES, A. M. A., FERRÃO, J. E. M., GOMES, M. H., & MIGUEL, M. G. C. Study of oxidative stress and antioxidant defense in young leaves of the halophyte plant species *Halimione portulacoides*. **Ecological Indicators**, v. 96, p. 104-110, 2019

TEISSEIRE, H.; GUY, V. Copper-induced changes in antioxidant enzymes activities in fronds of duckweed (*Lemna minor*), **Plant Sci.**, v. 153, p. 65–72, 2000.

WANG, Y., ZHU, W., HE, X., HUANG, Y., & HE, Z. Cadmium accumulation, toxicity, and tolerance in crops: A review. **Journal of Hazardous Materials**, 2021.

WILLEKENS, H., INZÉ, D., & MONTAGU, M. V. Catalases in plants. **Molecular Breeding**, v. 3, n. 3, p. 207-218, 1997.

WANG, S., SONG, J., & YANG, R. Transcriptome analysis provides insights into the molecular mechanisms underlying cadmium-induced seed dormancy in *Vicia faba* L. **Journal of Hazardous Materials**, v. 377, p. 98-105, 2019.

WU, M. et al. Physiological and Biochemical Mechanisms Preventing Cd Toxicity in the New Hyperaccumulator *Abelmoschus manihot*. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 37, n. 3, p. 709–718, 2018.

XU, X., LI, C., ZHANG, L., & SHI, J. Effects of cadmium stress on growth, antioxidative enzymes and lipid peroxidation in sugarcane leaves. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 23, p. 2357-2364, 2015.

XU, J., XIE, J., YAN, C., ZOU, X., REN, D., ZHANG, H., ... & SHEN, Q. Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under heat stress and accelerates recovery in grapevine leaves. **BMC plant biology**, v. 15, n. 1, p. 1-12, 2015.

XU, J.; YIN, H.; LI, X. Protective effects of proline against cadmium toxicity in micropropagated hyperaccumulator, *Solanum nigrum* L. **Plant Cell Reports**, v. 28, n. 2, p. 325–333, 2009.

YAN, Z. et al. Methyl jasmonate alleviates cadmium toxicity in *Solanum nigrum* by regulating metal uptake and antioxidative capacity. **Biologia plantarum**, v. 59, n. 2, p. 373–381, 2015.

ZHENG, R. et al. Converting loess into zeolite for heavy metal polluted soil remediation based on “soil for soil-remediation” strategy. **Journal of Hazardous Materials**, v. 412, p. 125199, 2021.

ZHANG, Y., JIANG, L., LIU, G., SHEN, F., & ZHANG, Z. Aluminum-induced changes in superoxide dismutase activity and isozyme expression in soybean roots. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 147, p. 1-9, 2020.

ZHAO, Y., CHEN, H., LI, T., LI, Y., & WU, X. Interactive effects of cadmium and aluminum on growth, mineral nutrient status, and organic acid metabolism in *Solanum melongena* L. seedlings. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 25, p. 20502-20514, 2017