

Artigo

Selênio como atenuador do estresse por cádmio em plântulas de milho na Amazônia

Jessica Suellen Silva Teixeira¹, Keila Beatriz Silva Teixeira², Gerson Diego Pamplona Albuquerque³, Juscelino Gonçalves Palheta⁴, Diana Jhulia Palheta de Sousa⁵, Luma Castro de Souza^{6,*}, Cândido Ferreira de Oliveira Neto⁷, Ricardo Shigueru Okumura⁸

- ¹ Engenheira agrônoma, Mestrado, Universidade Federal Rural da Amazônia/UFRA, Av. Tancredo Neves, nº 2501, Terra Firme, Cep: 66.077-830, Belém-PA, ORCID 0000-0001-9004-6894, jessicassteixeira27@gmail.com
 - ² Graduanda em Agronomia, Universidade Federal Rural da Amazônia/UFRA, Av. Tancredo Neves, nº 2501, Terra Firme, Cep: 66.077-830, Belém-PA, ORCID 0000-0001-6458-6619, keilabeatriz50@gmail.com
 - ³ Engenheiro agrônomo, Doutorado, Universidade Federal Rural da Amazônia/UFRA, Av. Tancredo Neves, nº 2501, Terra Firme, Cep: 66.077-830, Belém-PA, ORCID 0000-0002-7982-8817, gdpa88@gmail.com
 - ⁴ Engenheiro agrônomo, Doutorado, Universidade Federal Rural da Amazônia/UFRA, Av. Tancredo Neves, nº 2501, Terra Firme, Cep: 66.077-830, Belém-PA, ORCID 0000-0002-8726-6308, juscegoncalves@hotmail.com
 - ⁵ Engenheira agrônoma, Mestrado, Universidade Federal de Viçosa: Vicososa/UFV, Av. P H Rolfs, s/n - Campus Universitário, Cep: 36570-900, Viçosa - MG, BRORCID 0000-0002-8050-7260, dianajhuliap@gmail.com
 - ⁶ Engenheira agrônoma, Doutorado, Universidade Federal do Maranhão/UFMA, Centro de Ciências Agrárias e Ambientais (CCAA), BR-222, km 04, Boa Vista, Cep: 65500-000, Chapadinha, MA, ORCID 0000-0002-4500-4035, lumasouza30@hotmail.com
 - ⁷ Engenheiro agrônomo, Doutorado, Universidade Federal Rural da Amazônia/UFRA, Av. Tancredo Neves, nº 2501, Terra Firme, Cep: 66.077-830, Belém-PA, ORCID 0000-0002-6070-0549, candidooliveiraneto@gmail.com
 - ⁸ Engenheiro agrônomo, Doutorado, Universidade Federal Rural da Amazônia/UFRA, PA-275 s/n Zona Rural, Cep: 66.077-830, Parauapebas - PA, ORCID 0000-0002-5079-3980, ricardo_okumura@hotmail.com
- * Correspondência: lumasouza30@hotmail.com

Citação: Teixeira, J.S.S.; Teixeira, K.B.S.; Albuquerque, G.D.P.; Palheta, J.G.; Sousa, D.J.P.de; Souza, L.Cde; Oliveira Neto, C.F.; Okumura, R.S. Selênio como atenuador do estresse por cádmio em plântulas de milho na Amazônia. 2023, 12, 4. p. 17-28. <https://doi.org/10.47209/2317-5729.v.12.n.4.p.17-28>

Editor de Seção: Karen Janones da Rocha

Recebido: 03/03/2023

Aceito: 08/11/2023

Publicado: 31/12/2023

Nota do editor: A RBCA permanece neutra em relação às reivindicações jurisdicionais em sites publicados e afilições institucionais.



Copyright: © 2023 pelos autores. Enviado para possível publicação em acesso aberto sob os termos e condições da licença Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Cadmium (Cd) is considered one of the most widespread and harmful agricultural pollutants, and due to its high mobility and easy absorption by plants, it mainly causes the inhibition of their growth. Among the alternatives that aim to solve the problems induced by contamination with Cd in plants, is the use of attenuators such as selenium (Se) which is considered a beneficial element, which can increase its tolerance to various biotic and abiotic stresses. In this sense, the aim of this work was to evaluate the effect of selenium, in seed treatment, on the initial performance and osmoregulation of maize seedlings, under conditions of cadmium stress. Hybrid corn seeds (K9606 VIP 3) treated with sodium selenite in concentrations of 0.0; 1.5; 3.0 and 5.0 mg L⁻¹ of Se and subjected to different dosages of Cd (0.0; 1.3; 3.0 and 4.5 mg L⁻¹). The following were evaluated: root length (RL); shoot length (SL); root dry matter (RDM), shoot dry matter (SDM); total dry matter (TDM) and concentrations of total soluble carbohydrates (TSC), sucrose and proline in corn leaves and roots. The experimental design was completely randomized in a 4 × 4 factorial scheme, with four replications, consisting of 25 subsamples each. The presence of Cd reduced RL, SL, RDM, TDM and TSC, causing an increase in proline and sucrose contents in roots and leaves. In general, pre-treatment with Se before Cd exposure promoted an increase in RL, SL, RDM and MSPA production, with marked mitigation of the deleterious effects induced by Cd, through increases in proline, sucrose and CST in leaves, mainly at a dose of 5 mg L⁻¹ of Se. Selenium attenuated the toxic effects of cadmium on root dry mass, total dry mass, proline, sucrose and total soluble carbohydrates in the leaves of maize seedlings.

Keywords: Growth; Osmoregulators; Abiotic stress; Mitigation.

Resumo: O cádmio (Cd) é considerado como um dos poluentes agrícolas mais difundidos e prejudiciais, e devido sua alta mobilidade e fácil absorção pelas plantas, provoca, principalmente, a

inibição do crescimento destas. Dentre as alternativas que visam solucionar os problemas induzidos pela contaminação com Cd em plantas, está o uso de atenuadores como o selênio (Se) que é considerado um elemento benéfico, podendo aumentar sua tolerância aos diversos estresses bióticos e abióticos. Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito do selênio, no tratamento de sementes, sobre o desempenho inicial e a osmorregulação de plântulas de milho, em condições de estresse por cádmio. Utilizou-se sementes de milho híbrido (K9606 VIP 3) tratadas com selenito de sódio nas concentrações de 0,0; 1,5; 3,0 e 5,0 mg L⁻¹ de Se e submetidas a diferentes dosagens de Cd (0,0; 1,3; 3,0 e 4,5 mg L⁻¹). Foram avaliados: comprimento da raiz (CR); comprimento da parte aérea (CPA); matéria seca da raiz (MSR), matéria seca da parte aérea (MSPA); matéria seca total (MST) e as concentrações de carboidratos solúveis totais (CST), sacarose e prolina em folhas e raízes de milho. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 4 × 4, com quatro repetições, compostas por 25 subamostras cada. A presença de Cd reduziu o CR, CPA, MSR, MST e CST, provocando acréscimo nos teores de prolina e sacarose nas raízes e folhas. Em geral, o pré-tratamento com Se antes da exposição ao Cd promoveu aumento no CR, CPA, na produção de MSR e MSPA, com mitigação acentuada dos efeitos deletérios induzido pelo Cd, através de incrementos na prolina, sacarose e CST nas folhas, principalmente, na dose de 5 mg L⁻¹ de Se. O selênio atenuou os efeitos tóxicos do cádmio sobre a massa seca da raiz, massa seca total, prolina, sacarose e carboidratos solúveis totais nas folhas de plântulas de milho.

Palavras-chave: Crescimento; Osmorreguladores; Estresse abiótico; Mitigação.

1. Introdução

A contaminação do meio ambiente por metais pesados tem ocorrido nas últimas décadas principalmente como consequência de atividades antrópicas, sendo motivo de grande preocupação mundial, especialmente por não serem biodegradáveis, acumulando-se no solo, na água, no ar e na cadeia trófica (MOŹDZIERZ *et al.*, 2014).

O cádmio (Cd), é um poluente traço tóxico para humanos, animais e plantas, devido sua alta mobilidade nos solos, sendo facilmente absorvido pelas raízes e transportado para outras partes da planta, resultando em toxicidade mesmo em concentrações muito baixas (TEMPLETON; LIU, 2010; GALLEGO *et al.*, 2012; LI *et al.*, 2017).

Os solos de ambientes agrícolas podem apresentar acúmulo de Cd, devido à aplicação de fertilizantes fosfatados, adubos, resíduos de indústrias metalúrgicas e águas residuais não tratadas (AHMAD *et al.*, 2015). Após a exposição ao Cd, as plantas apresentam inibição do crescimento e da absorção de nutrientes, provocando diminuição da biomassa seca, clorose e atrofia foliar (LIU *et al.*, 2013, AHMAD *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2017).

Desta forma, têm-se procurado alternativas para a produção em solos com alta concentração de Cd, buscando diminuir os efeitos deletérios deste metal nas culturas, dentre estas estratégias encontra-se a utilização de atenuadores, e o selênio (Se) vêm sendo utilizado devido seu reconhecimento como elemento benéfico no crescimento vegetal, podendo aumentar a tolerância das plantas ao estresse.

Evidências demonstram que o tratamento de sementes, com uso de soluções contendo Se, mostra-se eficaz para melhorar a tolerância de plantas a diversos estresses ambientais, entre eles o de Cd (NAWAZ *et al.*, 2013). Estudos comprovam que o Se pode aumentar a tolerância das plantas à deficiência hídrica (HASANUZZAMAN; FUJITA, 2011; AHMAD *et al.*, 2015b), aos metais pesados (KUMAR *et al.*, 2012; GHORABA *et al.*, 2015; PANDEY; GUPTA, 2015) como Cd (FILEK, 2008, 2010) e a outros fatores ambientais, podendo reduzir os danos causados por vários estresses e conferir diversos benefícios fisiológicos aos vegetais incluindo aumentos no crescimento (HARTIKAINEN *et al.*, 2000).

De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), foram plantados na safra 2016/2017 aproximadamente 16.772 milhões de hectares de milho, obtendo-se uma produção de estimada em 88.969 milhões de toneladas e produtividade média de 5.305 kg ha de grão (CONAB, 2017).

A cultura do milho tem relevância para segurança alimentar, na alimentação dos seres humanos e animal, na produção de grãos, na silagem e na produção de milho-verde (CRUZ *et al.* 2013; MIRANDA, 2018). Além disso, pode-se produzir com o milho combustíveis, bebidas, polímeros, etc. (MIRANDA, 2018).

Neste contexto, várias estratégias podem ser adotadas para reduzir os níveis tóxicos de um elemento, dentre as quais destaca-se o uso de atenuadores como o selênio que são caracterizados como uso de elementos químicos benéficos capazes de diminuir a absorção de metais tóxicos por plantas em áreas de solos contaminados. Diante do exposto, o objetivo foi avaliar o efeito do Se, no tratamento de sementes, sobre o desempenho inicial e a osmorregulação de plântulas de milho, em condições de estresse por Cd.

2. Materiais e Métodos

2.1 Local do experimento

O experimento foi conduzido no Laboratório de Estudos em Biodiversidades de Plantas Superiores (EBPS) do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) em Belém - Pará (01°27'21" S, 48°30'16" W). O experimento foi montado em ambiente controlado, com temperatura de 25 ± 2 °C medidas no termo-hidrômetro.

Conforme a classificação climática de Köppen, o clima da região onde o experimento foi conduzido é do tipo Af (Floresta tropical), com precipitação média anual de 2921,7 mm, temperatura média de 25,9 °C, umidade relativa média de 86,8% e velocidade do vento de $1,35 \text{ m s}^{-1}$ (RAMOS, SANTOS, FORTES, 2009).

2.2 Tratamento das sementes

Foram utilizadas sementes de milho híbrido (K 9606 VIP 3), fornecidos pela empresa KWS sementes (KWS SAAT SE & Co. KGaA), que possui resistência a fusariose, a *Puccinia sorghi*, *Physopella zaeae* e a *Diplodia macrospora*, além de apresentar alta estabilidade produtiva, alto rendimento, ciclo precoce de 820 GD (graus-dias) e a altura da planta variando entre 225 – 240 cm (KWS, 2019).

As sementes foram embebidas em solução de selenito de sódio ($\text{Na}_2\text{O}_3\text{Se}$) nas concentrações de 0 (controle); 1,5; 3,0 e 5,0 mg L^{-1} de Se por um período de 6h a 25 ± 2 °C. Para o tratamento controle as sementes foram colocadas para embeber em água destilada por 6h na mesma temperatura.

2.3 Condução do experimento

O experimento foi conduzido em laboratório com regime de temperatura de 25 ± 2 °C, com fotoperíodo de oito horas, foram utilizados papel germitest umedecidos com cloreto de cádmio (CdCl_2) nas concentrações de 0 (controle); 1,3; 3,0 e 4,5 mg L^{-1} de Cd na quantidade equivalente a 2,5 vezes a massa do papel seco (BRASIL, 2009).

Para cada tratamento utilizou-se 100 sementes, divididas em quatro repetições com 25 subamostras, no qual as sementes foram posicionadas com a extremidade da radícula (hilo) para a parte inferior do papel, as quais foram distribuídas entre duas folhas de papel germitest, sendo, que em seguida foram organizadas em forma de rolo, onde permaneceram por sete dias, conforme o proposto por Brasil (2009). Os rolos foram acondicionados em sacos plásticos, transparentes, de 0,04 mm de espessura, com a finalidade de evitar a perda de água por evaporação.

2.4 Variáveis de crescimento e bioquímicas

As variáveis analisadas foram: comprimento das plântulas, comprimento de raiz, matéria seca da raiz, matéria seca da parte aérea, matéria seca total, prolina, sacarose e carboidratos solúveis totais.

O comprimento das plântulas foi avaliado conforme Nakagawa (1999), realizando-se a medição do comprimento da parte aérea (CPA), partindo-se do meristema apical até a base do hipocótilo, enquanto o comprimento de raiz (CR) foi obtido desde a base do hipocótilo até a extremidade da raiz primária. Foi utilizado, em cada tratamento, quatro repetições de 10 sementes, as medições ocorreram no sétimo dia após a semeadura, com auxílio de uma régua milimetrada, sendo os resultados expressos em cm plântula⁻¹.

No sétimo dia após a implantação do experimento, as plântulas normais foram retiradas do substrato e seus cotilédones, restante de sementes e/ou qualquer tipo de reserva foram removidos, obtendo-se apenas as plântulas, sendo separadas em raiz e parte aérea, e acondicionadas em sacos de papel e colocadas em estufa de ventilação forçada a 65°C. Posteriormente foram pesadas em uma balança de precisão de 0,0001g, para determinação da matéria seca da raiz (MSR), matéria seca da parte aérea (MSPA) e matéria seca total (MST).

Os parâmetros bioquímicos avaliados foram: 1. prolina (BATES; WALDREN; TEARE 1974), 2. sacarose (VAN HANDEL 1968) e 3. carboidratos solúveis totais (DUBOIS *et al.*, 1956).

2.5 Delineamento experimental e análise estatística

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC), em arranjo fatorial 4 x 4, com quatro repetições, com os fatores compreendendo níveis de Se (0 - controle); 1,5; 3,0 e 5,0 mg L⁻¹) e Cd (0 - controle); 1,3; 3,0 e 4,5 mg L⁻¹).

Os dados foram analisados, utilizando o *software* STATISTICA 12.0 (STATSOFT, 2014). Os dados foram submetidos a análise de variância pelo teste F e realizou-se a análise de regressão polinomial (superfície de resposta) quando a interação entre os fatores se apresentou significativa ($p < 0,05$).

3. Resultados e Discussão

3.1 Comprimento da plântula

Os resultados da análise de variância (ANAVA) da raiz e da parte aérea indicaram que o comprimento da raiz (CR) e o comprimento da parte aérea (Tabela 1), foram influenciados significativamente pelos efeitos isolados de Se ($p \leq 0,01$) e Cd ($p \leq 0,01$). Entretanto, não sofreram efeitos da interação entre os fatores.

Tabela 1 – ANAVA dos parâmetros comprimento da raiz, comprimento da parte aérea e comprimento total de plântulas de milho em função dos níveis de cádmio e selênio.

Causas de variação	Comprimento da raiz(cm plântula ⁻¹)	Comprimento da parte aérea (cm plântula ⁻¹)
	Valores de F	
Cádmio (Cd)	7.5963**	21.152**
Selênio (Se)	60.202**	5.2194**
(Cd x Se)	1.1439 ^{ns}	1.8870 ^{ns}
Média	20.12	5.00
CV (%)	0.7	8.3
Cádmio (Cd)	7.5963**	21.152**

^{ns} não significativo pelo Teste F; ** significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F.

Nas Figuras 1A e 1B, estão contidas as médias do CR e da CPA sob as concentrações de Cd. Através dos resultados, verificou-se que CR e CPA variaram de 19,47 a 20,53 e 4,70 a 5,23 cm, respectivamente, de tal forma que os menores valores resultaram da aplicação de 4,5 mg L⁻¹ Cd, ao passo que as maiores médias foram obtidas no tratamento controle.

Conforme o estudo de regressão, constatou-se que a aplicação de 4,5 mg L⁻¹ Cd provocou decréscimos lineares nos CR e CPA de 5,18 e 10,02%, respectivamente, em relação ao tratamento controle. Esses resultados podem ser explicados levando-se em conta que a toxidez por Cd restringe, principalmente, o crescimento, devido à inibição da formação de raízes laterais e da taxa de alongamento celular, e conseqüentemente, a produção de biomassa (HASHIM *et al.*, 2016). O efeito negativo do Cd sobre o CR e CPA de plântulas de milho, corroboram com os encontrados para milho e trigo (HUSSAIN *et al.*, 2012; RIZWAN *et al.*, 2016).

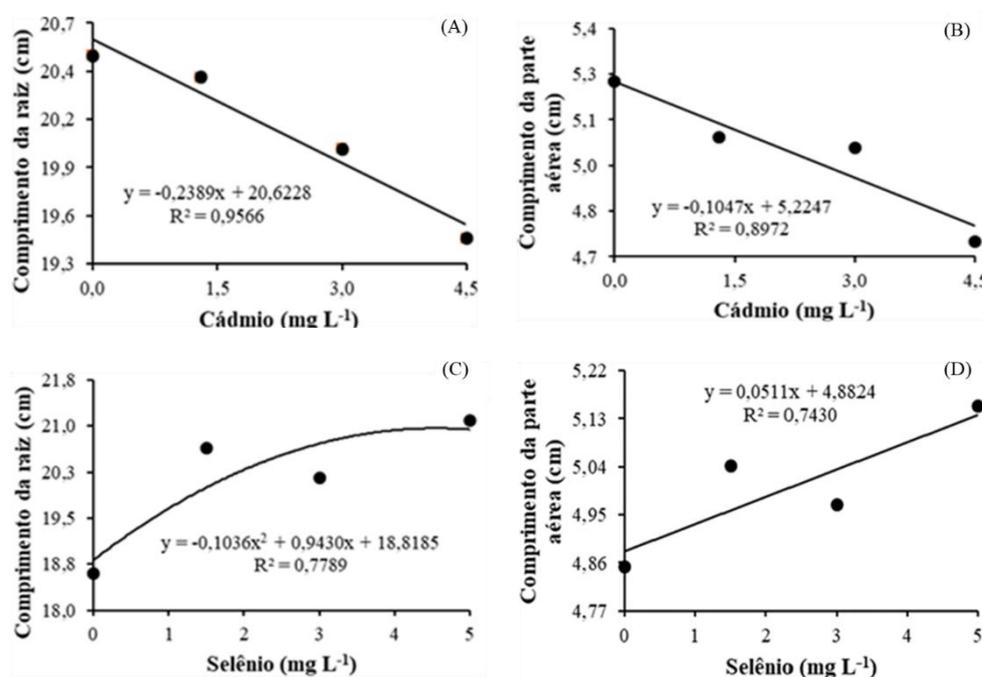


Figura 1. Comprimento da raiz e parte aérea em função das concentrações de cádmio (A e B) e selênio (C e D).

Constatou-se por meio dos resultados de CR (Figura 1C) e do CPA (Figura 1D) sob as concentrações de Se uma variação de 18,60 a 21,08 e 4,85 a 5,15 cm, respectivamente, de

tal forma que os menores valores foram obtidos no tratamento controle, enquanto as maiores médias resultaram da aplicação de 5 mg L⁻¹ de Se.

De acordo com a análise de regressão, verificou-se que a aplicação de 5 mg L⁻¹ Se proporcionou incrementos nos CR e CPA de 11,80 e 5,85%, respectivamente, em relação ao tratamento controle. Esses resultados se devem, possivelmente, ao fato de que o Se em baixas concentrações, melhora a meiose dos meristemas celulares das raízes das plantas, resultando em aumento no comprimento (HAN-WENS *et al.*, 2010).

3.2 Massa seca da plântula, raiz, parte aérea e total.

Conforme os resultados da ANOVA (Tabela 2), a acumulação de MSR, MSPA e MST, não foram influenciados pelos efeitos isolados das concentrações de Cd e Se. Sendo, a MSR e MST influenciadas pela interação entre esses fatores ($p \leq 0,05$).

Tabela 2 – ANAVA dos parâmetros massa seca da raiz, massa seca da parte aérea e massa seca total de plântulas de milho em função dos níveis de cádmio e selênio.

Causas de variação	Massa seca da raiz (g plântula ⁻¹)	Massa seca da parte aérea (g plântula ⁻¹)	Massa seca totalm (g platula ⁻¹)
	Valores de F		
Cádmio (Cd)	2.6265 ^{ns}	0.8130 ^{ns}	2.6644 ^{ns}
Selênio (Se)	0.5903 ^{ns}	0.8434 ^{ns}	0.4551 ^{ns}
(Cd xSe)	2.3834*	1.6930 ^{ns}	2.2190*
Média	0.95	0.44	1.39

^{ns} não significativo; * significativo a 5% de probabilidade pelo Teste F.

Segundo os resultados observados de acumulação de MSR (Figura 2A) e MST (Figura 2B) em função da interação entre as concentrações de Cd e Se, observam-se que as aplicações de Cd diminuíram linearmente a acumulação de massa seca da raiz e total em relação ao controle, sendo os menores valores de 0,78 e 1,21 g plântula⁻¹ para MSR e MST, respectivamente, ocorreram na maior dose aplicada de 4,5 mg L⁻¹ de Cd.

A combinação entre 5 mg L⁻¹ de Se e 4,5 mg L⁻¹ de Cd, proporcionou valores de 0,98 e 1,43 g plântula⁻¹ para MSR e MST, respectivamente. De acordo análise de regressão, verificou-se que a aplicação de 5 mg L⁻¹ Se conseguiu mitigar o efeito tóxico do Cd, incrementando nas MSR e MST cerca de 25,64 e 18,18%, respectivamente, em relação ao tratamento que continha apenas 4,5 mg L⁻¹ de Cd.

A diminuição da massa seca nos tratamentos contendo somente Cd, possivelmente, ocorreu devido ao primeiro órgão a entrar em contato com este elemento tóxico ser a raiz, promovendo assim, a acumulação de Cd no mesmo, inibindo desta forma o crescimento e a diminuição da massa seca (HASSAN; MANSOOR, 2014).

Entretanto, algumas características morfológicas como a biomassa seca e os sintomas foliares, de acordo com Xu *et al.* (2014), parecem ser insensíveis ao estresse de Cd o que justifica a falta de interação do Cd com a MSPA. O aumento da tolerância aos efeitos deletérios das concentrações de Cd pela aplicação de Se, que culminou em incrementos na acumulação da MSR e MST, deve-se ao fato do Se ser um elemento benéfico para as

plantas, exercendo um efeito positivo no crescimento e na produção de biomassa das plantas em baixa concentração (HASANUZZAMAN *et al.*, 2010).

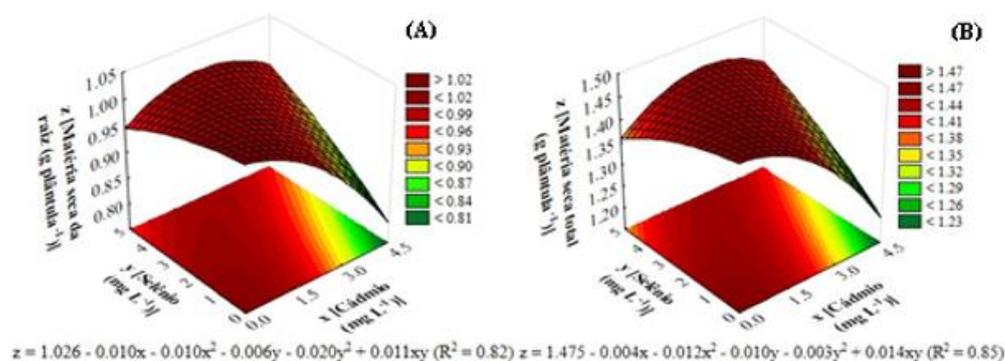


Figura 2. Matéria seca da raiz (A) e matéria seca total (B) de plântulas de milho em função da combinação entre os níveis de cádmio e selênio.

3.3 Variáveis bioquímicas: prolina, sacarose e carboidratos solúveis totais.

Os resultados da ANOVA apresentaram que os teores de prolina na folha ($p \leq 0,01$); sacarose na folha ($p \leq 0,05$) e CST nas folhas ($p \leq 0,01$) foram influenciados pela interação entre os fatores de Cd e Se.

Os teores de prolina na raiz ($p \leq 0,01$) e sacarose na raiz ($p \leq 0,05$) sofreram influência do efeito isolado da aplicação de Cd. Somente prolina na folha sofreu influência da aplicação isolada de Se ($p \leq 0,01$). Enquanto, os teores de CST nas raízes não foram influenciados pelos efeitos isolados das concentrações de Cd e Se, nem pela interação entre os fatores (Tabela 3).

Tabela 3 – ANAVA das concentrações de prolina, sacarose e carboidratos solúveis totais (CST) em folhas e raízes de plântulas de milho em função dos níveis de cádmio e selênio.

Causas de variação	Prolina folha	Prolina raiz	Sacarose folha	Sacarose raiz	CST folha	CST raiz
Cádmio (Cd)	4.2828**	5.0873**	2.0685 ^{ns}	3.8470*	8.8115**	0.706 ^{ns}
Selênio (Se)	6.8984**	0.8070 ^{ns}	0.5717 ^{ns}	0.8961 ^{ns}	0.4598 ^{ns}	0.357 ^{ns}
(Cd x Se)	4.8811**	1.2476 ^{ns}	2.4196*	1.9890 ^{ns}	7.4361**	1.742 ^{ns}
Média	4.77	4.10	18.36	27.47	4.95	6.32
CV (%)	26.4	37.1	27.8	21.8	19.2	30.8

^{ns} não significativo; ** significativo a 1% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade pelo Teste F.

Através dos resultados, verificou-se que houve variação de 3,41 a 4,71 mg PRO g⁻¹ MS, dos teores de prolina na raiz sob as concentrações de Cd (Figura 3A), sendo o menor valor resultado da aplicação de 3 mg L⁻¹ Cd, enquanto a maior média foi obtida por meio da aplicação de 4,5 mg L⁻¹ Cd. Constatou-se que de 4,5 mg L⁻¹ Cd resultou em incrementos de 38% em relação ao tratamento com a aplicação de 3 mg L⁻¹ Cd.

O valor obtido no tratamento controle foi de 4,39 mg PRO g⁻¹ MS e é possível observar por meio da análise de regressão que ocorreu uma diminuição linear nos teores de prolina na raiz até a aplicação de 3 mg L⁻¹ Cd, resultando em um decréscimo de 22,38% em relação ao controle.

Na Figura 3B estão contidos os resultados observados para os teores de prolina nas folhas em função da interação entre as concentrações de Cd e Se. Observa-se que as aplicações de Cd isoladamente aumentaram os teores de prolina em relação ao tratamento controle, sendo constatada uma variação de 4,81 a 5,83 mg PRO g⁻¹ MS para o tratamento controle e 5 mg L⁻¹ Cd, respectivamente, sendo este um incremento de 21,21%.

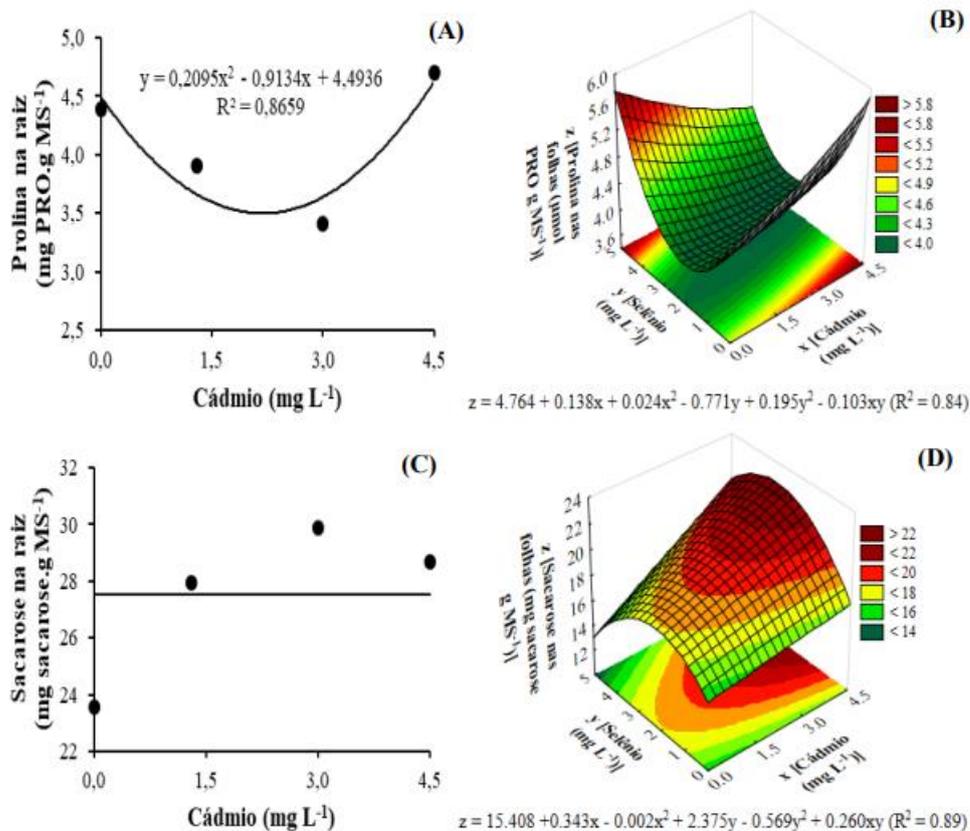


Figura 3. Concentração de prolina nas folhas (A) e raízes (B), concentração de sacarose nas folhas (C) e raízes (D) de plântulas de milho em função das concentrações de cádmio e selênio

Em relação às aplicações de Se, constatou-se que houve uma diminuição nos teores de prolina até a concentração 3 mg L⁻¹ Se e posteriormente houve um aumento quando aplicada a dose de 5 mg L⁻¹ Se, resultando em um acréscimo de 19,96% em comparação ao tratamento controle. Conforme a análise de regressão, pode-se observar onde a aplicação de 4,5 mg L⁻¹ Cd combinada com 5 mg L⁻¹ Se apresentou valor de 4,79 mg PRO g⁻¹ MS, sendo este 17,84% menor que o encontrado na concentração de 4,5 mg L⁻¹ Cd isoladamente.

Neste estudo, o acúmulo de prolina encontrado nas folhas e raízes de plântulas de milho, quando aplicada a maior concentração de Cd, está associado ao seu papel osmo-protetor, sendo uma estratégia adaptativa das plantas em manter o equilíbrio osmótico,

eliminando o excesso de radicais livres e estabilizando a estrutura da membrana celular (SINGH *et al.*, 2016).

A aplicação de Se proporcionou o acúmulo de prolina nas folhas, devido este elemento estimular a atividade de enzimas do metabolismo da prolina, aumentando sua produção (ABBAS, 2012). O Se melhorou a tolerância ao Cd nas plântulas de milho, proporcionando um melhor mecanismo de defesa que pode ser constatado pela diminuição do conteúdo de prolina conforme ocorre a interação entre os fatores.

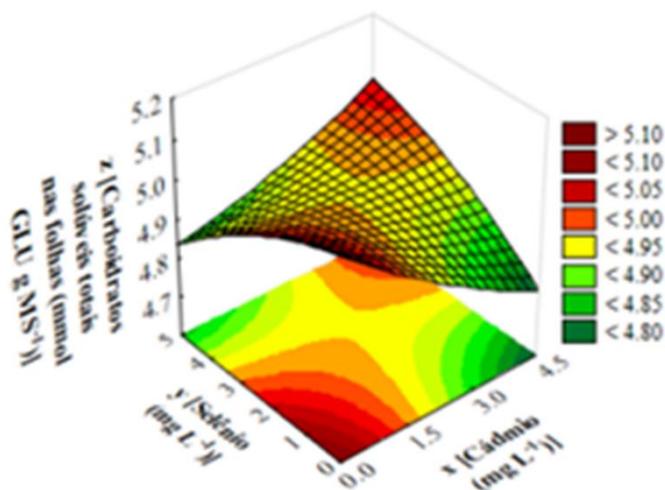
Para o teor de sacarose da raiz sob as concentrações de Cd (Figura 3C), foi observado uma variação de 23,54 a 29,90 mg sacarose g⁻¹ MS, a menor média foi obtida por meio da aplicação do tratamento controle, enquanto, o maior valor resultante da aplicação de 3 mg L⁻¹ Cd. A aplicação de 3 mg L⁻¹ e 4,5 mg L⁻¹ Cd resultou em incrementos de 26,99 e 21,88%, respectivamente, em relação ao tratamento controle.

A interação entre 3 mg L⁻¹ de Se e 4,5 mg L⁻¹ de Cd, proporcionou a média de 22,4 mg sacarose g⁻¹ MS para o teor de sacarose na folha (Figura 3D). De acordo a análise de regressão, verificou-se que a aplicação de 3 mg L⁻¹ Se conseguiu mitigar o efeito tóxico do Cd, incrementando nos teores de sacarose de 31,76 e 43,59% em relação aos fatores que continham 4,5 mg L⁻¹ de Cd isoladamente e ao tratamento controle, respectivamente.

Os aumentos nos teores de sacarose, deve-se ao fato deste desempenhar um papel fundamental protegendo tanto contra os danos causados pelo estresse osmótico quanto pelo oxidativo, podendo estar relacionado ao bloqueio no seu transporte e/ou a redução de sua utilização durante o estresse (BADR *et al.* 2015). Tendo a aplicação de Se contribuído para uma melhora na proteção das plantas por meio da acumulação de sacarose nas folhas, evitando a perda de água.

Os teores de CST na folha (Figura 4) variou entre 4,78 e 5,11 mmol GLU g⁻¹ MS para a aplicação de 4,5 mg L⁻¹ de Cd e o tratamento controle, respectivamente. Na análise de regressão é possível notar que ocorreu um decréscimo linear de 6,46% entre o tratamento controle e a dose de 4,5 mg L⁻¹ de Cd. A interação entre os maiores níveis aplicados de Cd e Se proporcionou a média de 5,02 mmol GLU g⁻¹ MS, sendo representado pelo incremento de 5,02% em relação ao encontrado na concentração de 4,5 mg L⁻¹ de Cd quando aplicado isoladamente.

A diminuição nos teores de CST nas folhas em resposta a aplicação isolada de Cd, está relacionada ao fato do Cd inibir o crescimento, e como resposta, a planta diminui a concentração de carboidratos, devido ao Cd interferir no processo fotossintético, e assim, diminuir a produção de açúcares. A toxicidade do Cd reduziu o acúmulo de CST, contudo, o tratamento com Se proporcionou uma melhora nesse acúmulo. Portanto, o acúmulo de CST nas folhas por meio da aplicação de Se pode estar relacionado à manutenção do status hídrico da planta e a eliminação de espécies reativas de oxigênio sob condições de estresse abiótico (SEVCIKOVA *et al.*, 2017).



$$z = 5.109 - 0.096x + 0.004x^2 - 0.026y - 0.006y^2 + 0.024xy \quad (R^2 = 0.93)$$

Figura 4. Concentração de carboidratos solúveis totais nas folhas (E) de plântulas de milho em função das concentrações de cádmio e selênio

5. Conclusão

O selênio atenuou os efeitos tóxicos do cádmio sobre a massa seca da raiz, massa seca total, prolina, sacarose e carboidratos solúveis totais nas folhas de plântulas de milho, podendo desta forma, aumentar a capacidade de defesa dessas plantas contra esse estresse, sendo a dose de 5 mg L⁻¹ de Se a que contribui para uma melhor mitigação dos efeitos deletérios do metal cádmio.

Quando analisado isoladamente, o Se conseguiu promover incrementos nos valores de CR, CPA e prolina na folha.

O selênio tem potencial para ser utilizado como atenuador em solos contaminados pelo metal pesado cádmio.

Estudos voltados para entender o efeito atenuador do selênio no metabolismo vegetal ainda são necessários, principalmente os relacionados ao metabolismo do nitrogênio.

Referência bibliográfica

- ABBAS, S. M. Effects of low temperature and selenium application on growth and the physiological changes in sorghum seedlings. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*. V. 8, p. 268 – 286, 2012.
- AHMAD, P. et al. Alleviation of cadmium toxicity in *Brassica juncea* L. (Czern. & Coss.) by calcium application involves various physiological and biochemical strategies. *PLoS One*, v. 10(1), 2015.
- BADR, A.; ANGERS, P.; DESJARDINS P. Comprehensive analysis of in vitro to ex vitro transition of tissue cultured potato plantlets grown with or without sucrose using metabolic profiling technique. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, v. 122: p. 491-508, 2015.
- BATES, L.S.; WALDREN, R. P.; TEARE, I. D. Rapid Determination of Free Proline for Water-Stress Studies. *Short Communication. Plant Soil*, v. 39, p. 205-207, 1973.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 399p.
- DUBOIS M. *et al.* Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Analytical Chemistry*, v.28, p. 350-356, 1956.

- CONAB. Estimativa do escoamento das exportações do complexo soja e milho pelos portos nacionais safra 2016/17. Brasília: Conab, 2017.
- CRUZ, J. C.; MAGALHÃES, P. C.; PEREIRA, I. A.; QUEIROZ, L. R. Milho: cultivares para 2013/2014. Embrapa Milho e Sorgo, 2013.
- FENG, R. W. *et al.* A dual role of Se on Cd toxicity: evidences from the uptake of Cd and some essential elements and the growth responses in paddy rice. *Biological Trace Element Research*, v. 151, p. 113–121, 2013.
- FILEK, M. *et al.* Effect of selenium on characteristics of rape chloroplasts modified by cadmium. *Journal of Plant Physiology*, v.167, n. 5, p.28-33, 2010.
- GALLEGO, S. *et al.* Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: insight into regulatory mechanisms. *Environmental and Experimental Botany*, v. 83, p. 33–46, 2012.
- GHORABA, W. F.; MOHSEN, A. A. Role of selenium on Vicia faba seedlings subjected to mercury and cadmium stress. *Integrated Journal of British*, v. 2, p:16-44, 2015.
- HAN-WEN, S. *et al.* Protective role of selenium on garlic growth under cadmium stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 41, n. 10, p. 1195-1204, 2010.
- HARTIKAINEN, H.; XUE, T.; PIIRONEN, V. Selenium as an anti-oxidant and pro-oxidant in ryegrass. *Plant Soil*, v. 225, p. 193–200, 2000.
- HASANUZZAMAN, M.; HOSSAIN, M. A.; FUJITA, M. Selenium in higher plants: physiological role, antioxidant metabolism and abiotic stress tolerance. *Journal of Plant Sciences*, v. 5, p. 354 – 375, 2010.
- HASHEM, A. *et al.* Bioremediation of adverse impact of cadmium toxicity on Cassia italica Mill by arbuscular mycorrhizal fungi. *Saudi Journal Biological Sciences*. v. 23, p. 39–47, 2016.
- HASSAN, M.; MANSOOR, S. Oxidative stress and antioxidant defense mechanism in mung bean seedlings after lead and cadmium treatments. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, v.38, n. 6, p.55-6, 2014.
- HUSSAIN, I. *et al.* Cadmium dose and exposure-time dependent alterations in growth and physiology of maize (*Zea mays*). *International Journal of Agriculture and Biology*. v. 14, p. 959–964, 2012.
- KWS. Ficha de Produto K9606 VIP3. Disponível em: https://mediamaster.kws.com/01_Products/BR_Brazil/Productsheets/Mais/k9606_vip3.pdf. Acessado em: 19/12/2019.
- LI, H. *et al.* Cadmium in rice: transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures. *Environmental Pollution*, v. 224, p. 622–630, 2017.
- LIU, Y. *et al.* Complex II of the mitochondrial respiratory chain is the key mediator of divalent manganese-induced hydrogen peroxide production in microglia. *Toxicological Sciences*, v. 132, p. 298– 306, 2013.
- MIRANDA, R. A. Uma história de sucesso da civilização. *A Granja*, v.74, n.829, p.24-27, 2018.
- MOŹDZIERZ, A.; JUSZKO-PIEKUT, M.; STOJKO, J. Cadmium contamination of atmospheric air in the Silesian cities. *Environmental Medicine*. v. 17(1), p. 25-33, 2014.
- NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados na avaliação de plântulas. In: KRZYŻANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA-NETO, J. B. (Ed.). *Vigor de sementes: conceitos e testes*. Londrina: ABRATES, 1999.
- NAWAZ, F. *et al.* Selenium (Se) seed priming induced growth and biochemical changes in wheat under water deficit conditions. *Biological Trace Elements Research*, v. 151, p. 284– 293, 2013.
- PANDEY, C.; GUPTA, M. Selenium and auxin mitigates arsenic stress in rice (*Oryza sativa* L.) by combining the role of stress indicators, modulators and genotoxicity assay. *Journal of Hazardous Materials*, v. 287, p. 384–391, 2015.
- RAMOS, A. M.; SANTOS, L. A. R.; FORTES, L. T. G. Normais climatológicas do Brasil 1961-1990. rev. e ampl. Brasília: INMET. 2009.
- RIZWAN, M. *et al.* Effect of silicon on reducing cadmium toxicity in durum wheat (*Triticum turgidum* L. cv. Claudio W.) grown in a soil with aged contamination. *Journal of Hazardous Materials*. p. 326–334, 2012.
- ŠEVČÍKOVÁ, H. *et al.* Carbohydrates and gibberellins relationship in potato tuberization. *Journal of Plant Physiology*, v. 214, p. 53-63, 2017.

-
- SINGH S. *et al.* Heavy Metal Tolerance in Plants: Role of Transcriptomics, Proteomics, Metabolomics, and Ionomics. *Frontiers in Plant Science* v.6, p. 1-36, 2016.
- STATSOFT, I. Statistica (Data Analysis Software System), Version 10 (Tulsa, Oklahoma, USA, StatSoft Inc.), 2014.
- TEMPLETON, D. M.; LIU, Y. Multiple roles of cadmium in cell death and survival. *ChemicoBiological Interactions*, p. 267–275, 2010.
- VAN HANDEL, E. Direct Microdetermination of Sucrose. *Analytical Biochemistry*, v. 22, p. 280-283, 1968.
- XU, X. *et al.* Involvement of an antioxidante defense system in the adaptive response to cadmium in maize seedlings (*Zea mays* L.). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. v.93, p. 618–624. 2014.