



JÉSSICA AIRES DOS SANTOS

**APLICAÇÃO FOLIAR DE SELÊNIO E CALAGEM EM
MUDAS DE *Theobroma cacao* L. PARA MINIMIZAR A
TOXICIDADE DE CÁDMIO**

**LAVRAS – MG
2026**

JÉSSICA AIRES DOS SANTOS

APLICAÇÃO FOLIAR DE SELÊNIO E CALAGEM EM MUDAS DE *Theobroma cacao* L. PARA MINIMIZAR A TOXICIDADE DE CÁDMIO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, área de concentração em Fisiologia Vegetal, para obtenção do título de mestre.

Orientador
Prof. Luiz Roberto Guimarães Guilherme, Ph.D.
Orientador

Coorientadora
Dra. Mariana Rocha de Carvalho

**LAVRAS – MG
2026**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Santos, Jéssica Aires dos.

Aplicação foliar de selênio e calagem em mudas de Theobroma cacao L. para
minimizar a toxicidade de cádmio / Jéssica Aires dos Santos. - 2026.
42 p.

Orientador: Luiz Roberto Guimarães Guilherme

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2026.
Bibliografia.

1. Metabolismo vegetal. 2. Segurança alimentar. 3. Elementos minerais.. I.
Guimarães Guilherme, Luiz Roberto. II. Universidade Federal de Lavras. III. Título.

JÉSSICA AIRES DOS SANTOS

APLICAÇÃO FOLIAR DE SELÊNIO E CALAGEM EM MUDAS DE *Theobroma cacao* L. PARA MINIMIZAR A TOXICIDADE DE CÁDMIO

FOLIAR APPLICATION OF SELENIUM IN AND LIMINING ON *Theobroma cacao* L. SEEDLINGS TO MINIMIZE CADMIUM TOXICITY

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, área de concentração em Fisiologia Vegetal, para obtenção do título de mestre.

APROVADA em 29 de junho de 2026.

Dra. Cynthia de Oliveira UFLA

Prof. Dr. Flavio Henrique Silveira Rabelo USP

Prof. Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme UFLA

Orientador

Prof. Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme

Coorientadora

Dra. Mariana Rocha de Carvalho

**LAVRAS – MG
2026**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu Deus, por ter escrito um novo e lindo capítulo da minha vida. Sua rica misericórdia me permitiu sonhar com esse mestrado e me sustentou ao longo de toda essa caminhada. A ele, toda a minha gratidão por ter me permitido chegar até aqui.

À minha irmã Larissa, que desde sempre acreditou e me apoiou em todos os aspectos da minha vida. Sem você, eu não teria cursado biologia e, certamente não teria alcançado esse mestrado. Obrigada por acreditar em mim, muitas vezes mais do que eu mesma.

À uzilene e a Antonete por todo acolhimento, carinho e apoio ao longo da minha vida. Vocês são dadivas de Deus e sou profundamente grata por tê-las em minha caminhada.

À minha mãe e aos meus irmãos por todo apoio, carinho e incentivo ao longo dessa trajetória.

Aos amigos que fiz durante o curso, por todos os momentos compartilhados, pelo apoio e pela amizade. Vocês foram essenciais para que eu prosseguisse, especialmente nos momentos que a caminhada se tornou mais difícil.

Aos meus orientadores pela paciência, ensinamentos e contribuições para minha formação. Sou grata por todos os conhecimentos compartilhados ao longo desta trajetória.

À Universidade Federal de Lavras – UFLA e ao Programa de Pós Graduação em Fisiologia Vegetal pela estrutura oferecida e pela oportunidade de realização do Mestrado.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de estudos, que tornou possível a realização do Mestrado.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que eu chegasse até aqui, minha sincera gratidão.

RESUMO

A presença de cádmio no solo pode comprometer o desempenho fisiológico e nutricional das plantas e representa uma preocupação para a segurança alimentar. O selênio e a calagem tem sido estudados como alternativa para minimizar os efeitos da toxicidade do cádmio. Nesse contexto, este estudo avaliou os efeitos fisiológicos e nutricionais da aplicação de selênio sob a toxicidade e teor de cádmio em mudas de *Theobroma cacao* L, genótipo CCN51, cultivadas e, solo com e sem calagem. O experimento foi realizado em casa de vegetação na Universidade Federal de Lavras, utilizando um esquema fatorial de 2 x 3. Os fatores correspondem a dois níveis de cádmio e três doses de selênio (0, 10, 20 mg L⁻¹), conduzido de forma independente, sob duas condições de solo (com e sem calagem). Foram avaliados parâmetros fisiológicos, atividade de enzimas antioxidantes, teores de nutrientes, cádmio e selênio nos tecidos foliares, e cádmio disponível no solo. O cádmio reduziu o índice de clorofila e promoveu alterações na condutância estomática e na dinâmica de nutriente. A aplicação de selênio reduziu a disponibilidade de cádmio no solo, tanto na ausência quanto na presença de calagem. Entretanto, não foram observadas diferenças significativas no teor de cádmio foliar em respostas as doses de selênio. Assim, a aplicação de selênio contribuiu para minimizar os efeitos da toxicidade do cádmio em mudas de *T. cacao* do genótipo CCN51, mas não reduziu o teor de cádmio nos tecidos foliares.

Palavras-chave: fitotoxicidade; metabolismo vegetal; segurança alimentar; elementos minerais.

ABSTRACT

The presence of cadmium can compromise the physiological and nutritional performance of plants and pose a food safety concern. Selenium application and liming have been investigated as alternatives to minimize the effects of cadmium toxicity. In this context, this study evaluated the physiological and nutritional effects of selenium application on cadmium toxicity and content in *Theobroma cacao* L. seedlings (genotype CCN51) grown in soil with and without liming. The experiment was conducted in a greenhouse at the Federal University of Lavras using a 2×3 factorial design, involving two cadmium levels and three selenium doses (0, 10, and 20 mg L⁻¹) under two soil conditions (with and without liming). Physiological parameters, antioxidant enzyme activity, nutrient, cadmium, and selenium contents in leaf tissues, and available soil cadmium were evaluated. Cadmium impairs the chlorophyll index and alters stomatal conductance and nutrient dynamics. Selenium application reduces cadmium availability in the soil, both in the absence and presence of liming. However, no significant differences in leaf cadmium content were observed in response to selenium doses. Thus, selenium application helped minimize the effects of cadmium toxicity in *T. cacao* seedlings (genotype CCN51) but did not reduce cadmium content in leaf tissues.

Keywords: phytotoxicity; plant metabolism; food safety; mineral elements.

INDICADORES DE IMPACTO

O presente estudo possui impactos científicos, tecnológicos, socioeconômicos e ambientais relevantes ao investigar a mitigação do estresse por cádmio em cacauzeiro (*Theobroma cacao* L., genótipo CCN51) por meio da aplicação foliar de selênio. Com o aumento das questões envolvendo teores de cádmio acima do permitido em produtos derivados do cacau, a contaminação dos solos em regiões produtoras representa um gargalo econômico para o setor e um risco à saúde pública. A pesquisa demonstra que o fornecimento de selênio preserva índices fisiológicos vitais, além de modular a disponibilidade do metal pesado na rizosfera. Os resultados beneficiam diretamente a cadeia produtiva cacauzeira, promovendo a sustentabilidade da atividade agrícola e garantindo a conformidade do cacau brasileiro com as exigências dos mercados interno e externo. Sob a perspectiva da saúde pública e da extensão, o projeto contou com a parceria do Instituto Biofábrica da Bahia para o fornecimento das mudas e contribui para a inocuidade dos alimentos ao reduzir o ingresso de cádmio na cadeia alimentar humana. Dessa forma, o estudo alinha-se às diretrizes da Política Nacional de Extensão nas áreas de Meio Ambiente, Tecnologia e Produção, e Saúde, além de responder diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas, com ênfase no Fome Zero e Agricultura Sustentável (ODS 2), Saúde e Bem-Estar (ODS 3), e Consumo e Produção Responsáveis (ODS 12).

IMPACT INDICATORS

This study has significant scientific, technological, socioeconomic, and environmental implications by investigating the mitigation of cadmium stress in cacao trees (*Theobroma cacao* L., genotype CCN51) through the foliar application of selenium. Given growing concerns regarding cadmium levels exceeding permissible limits in cocoa-derived products, soil contamination in producing regions poses both an economic bottleneck for the sector and a public health risk. The research demonstrates that selenium supplementation preserves vital physiological parameters and modulates the availability of the heavy metal in the rhizosphere. These results directly benefit the cocoa supply chain, promoting agricultural sustainability and ensuring that Brazilian cocoa meets the requirements of both domestic and international markets. From a public health and extension perspective, the project partners with the *Instituto Biofábrica da Bahia* to implement changes and contribute to food safety by reducing cadmium entry into the human food chain. Thus, the study aligns with the guidelines of the National Extension Policy in the areas of Environment, Technology and Production, and Health, while directly addressing the United Nations Sustainable Development Goals—specifically Zero Hunger and Sustainable Agriculture (SDG 2), Good Health and Well-being (SDG 3), and Responsible Consumption and Production (SDG 12).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REFERÊNCIAL TEÓRICO	17
2.1 Aspectos gerais da espécie <i>Theobroma cacao</i>	17
2.2 Cádmio no ambiente	18
2.3 Cádmio na saúde humana	18
2.4 Cádmio nas plantas	20
2.4.2 Mitigação de cádmio com elementos minerais.....	21
2.5 Aspectos gerais do selênio.....	23
2.6 Selênio nas plantas	24
3 OBJETIVOS.....	25
3.1 Objetivo Geral	25
3.2 Objetivos Específicos.....	26
4 HIPÓTESE	26
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
5.1 Área da pesquisa	26
5.2 Delineamento experimental.....	27
5.3 Aplicação foliar de selênio	28
5.4 Avaliações fisiológicas	28
5.5 Enzimas antioxidantes	29
5.6 Análises de determinação de cádmio e selênio.....	29
5.7 Análises de determinação nutricional.....	30
5.8 Análises estatísticas	30
6 RESULTADOS.....	30
6.1 Índice de clorofila	30
6.2 Trocas gasosas	31
6.3 Enzimas antioxidantes	32
6.4 Macronutrientes	33
6.5 Micronutrientes	34
6.6 Cádmio na planta e no solo.....	35
6.7 Teor foliar de selênio.....	36
7 DISCUSSÃO	37
8 CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

O cádmio (Cd) é um elemento-traço que não possui função biológica elucidada. Por outro lado, é considerado prejudicial tanto para o desenvolvimento das plantas quanto para a saúde humana. É encontrado naturalmente no solo e sua disponibilidade é favorecida por atividades como mineração, fundição de metais, aplicação de fertilizantes fosfatados contaminados e outras atividades antropogênicas, podendo ser facilmente ser absorvido pelo sistema radicular das plantas (MCLAUGHLIN et al., 2021).

As plantas não possuem transportadores específicos ou seletivos para o Cd, portanto, sua entrada ocorre por meio de transportadores de cálcio, ferro, magnésio, manganês, cobre e zinco (CLEMENS, 2006). Essa competição por locais de absorção pode interferir na ação de elementos que exercem funções fisiológicas nas plantas. Algumas culturas, como o cacauieiro (*Theobroma cacao* L.), são particularmente propensas a absorver o Cd e, uma vez translocado para as folhas, o Cd é transportado pelo floema até os frutos (WADE et al., 2022).

O cacau é uma commodity agrícola de grande relevância mundial, tendo a Costa do Marfim (43%), Gana (12%), Equador (7%), Brasil (5,4%), Camarões (5,4%), Nigéria (5,2%) e Peru (3%) como os principais produtores (FAOSTAT, 2023). No Brasil, o cultivo é concentrado principalmente nas regiões Norte e Nordeste, com o Pará e a Bahia responsáveis por cerca de 95% da produção nacional, com a Bahia liderando a produção (BRASIL, 2022). A importância dessa *commodity* está principalmente relacionada ao processamento dos grãos, que são utilizados para produzir licor, manteiga e chocolate, produtos amplamente consumidos, especialmente o chocolate.

Atualmente, há uma grande preocupação relacionada à presença de cádmio no cacauieiro e, conseqüentemente, nos produtos derivados dessa planta. Com o objetivo de garantir a segurança alimentar, pesquisas têm sido desenvolvidas visando mitigar o acúmulo de cádmio nas plantas e, por conseguinte, nos produtos derivados. Estudos de WU et al. (2020), JIANG et al. (2022) e WANG et al. (2022) demonstraram que a aplicação foliar de selênio (Se) reduziu o acúmulo de Cd em plantas de trigo, arroz e noqueira, respectivamente. Considerando o exposto, esta pesquisa objetivou avaliar os efeitos da aplicação foliar de selênio no genótipo CCN51 de cacauieiro cultivado em solos contaminados com cádmio, sob a hipótese de que a aplicação de Se minimiza a toxicidade e o acúmulo de cádmio nas folhas de *Theobroma cacao*.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Aspectos gerais da espécie *Theobroma cacao*

A espécie *Theobroma cacao* L. (cacaueiro) pertence à família Malvaceae e é nativa da América Central e do Sul. É uma planta frutífera, cauliflora, perene de porte arbóreo, que se dissemina por sementes e reprodução vegetativa (DE SOUZA et al., 2018). Atinge cerca de 5 a 8 m de altura e entre 4 e 6 diâmetros de copa, podendo alcançar até 20 m de altura em condições de florestas (CEPLAC, 2001). De acordo com De SOUZA et al. (2018), o cacaueiro apresenta as seguintes características morfológicas: sistema radicular composto por uma raiz pivotante e raízes secundárias responsáveis pela absorção de nutrientes do solo; o caule tem aspecto de casca lisa (periderme) e posteriormente torna-se áspero e rugoso. As folhas apresentam nervura central proeminente, e a coloração varia de acordo com as cultivares. As flores surgem nos troncos ou ramos lenhosos, a partir de botões que se desenvolvem nas axilas de folhas antigas. São monoicas, constituídas de cinco pétalas, cinco estames e um pistilo com ovário que possui cinco óvulos. A semente é coberta por uma polpa mucilaginosa. O embrião possui dois cotilédones cujas cores variam de branco a violeta. O fruto é alongado e sulcado, sustentado por um pedúnculo lenhoso (DE SOUZA et al., 2018).

O cacaueiro é uma planta com metabolismo fotossintético do tipo C_3 , naturalmente adaptada a ambientes com sombra moderada. Possui alta exigência hídrica e apresenta uma transpiração relativamente elevada, acompanhada de baixa regulação estomática, o que a torna sensível ao déficit de água. Em condições sombreadas, suas folhas tendem a desenvolver maior área foliar específica e maiores concentrações de clorofilas, melhorando a eficiência na captação de luz (ALMEIDA & VALLE, 2007). A espécie tolera uma ampla faixa de pH, variando entre 4,5 e 7,4 na Costa Rica, e entre 5,5 e 6,0 no Brasil (CARRILLO et al., 2023; CHEPOTE et al., 2013)

O cacaueiro está dentre as culturas com grande relevância agrícola no nível mundial, contribuindo para a subsistência de milhões de pessoas (TOSTO et al., 2023). A sua semente tem grande importância no mercado, sendo utilizada nas indústrias de cosméticos e na farmacêutica e, principalmente do chocolate. Contém compostos com capacidade oxidante, contribuindo para a prevenção de doenças autoimunes e auxiliando nos níveis de colesterol (ASSA et al., 2018). Além disso, o cacau é uma fonte rica em flavonoides, que promove benefícios à saúde, e reduzindo o risco do desenvolvimento de doenças cardiovasculares e distúrbios metabólicos (MARTIN & RAMOS, 2021).

2.2 Cádmio no ambiente

O cádmio não está incluído no grupo de elementos químicos essenciais ao ciclo de vida das plantas. Por outro lado, é reconhecido como um dos elementos mais prejudiciais para o crescimento e desenvolvimento vegetal. Trata-se de um elemento-traço que ocorre naturalmente nos solos e é aumentado no ambiente por meio de atividades de mineração, fundições de metais, baterias, pigmentos e plásticos (MCLAUGHLIN et., 2021).

A biodisponibilidade do cádmio no solo gera grande preocupação quanto à absorção e acumulação pelas plantas. Fatores como pH, matéria orgânica, a presença de outros elementos catiônicos e a espécie vegetal influenciam esse processo. Dentre esses fatores, o pH do solo é considerado um dos principais. Em solos ácidos (pH baixo), há uma maior probabilidade de o cádmio se tornar disponível para as plantas, pois o pH baixo pode aumentar a solubilidade do Cd, facilitando a sua conversão para formas biodisponíveis, especialmente em forma de cátion Cd^{2+} (LI et al., 2014).

Em ambientes com pH baixo, os elementos presentes na forma aniônica tendem a ser retidos pelos coloides do solo, enquanto os cátions tendem a ter mais disponibilidade. Por outro lado, em ambientes com pH básico (pH alto), o cádmio tende a formar espécies hidroxiladas, como $\text{Cd}(\text{OH})^+$ (SHAARI et al., 2024), e os elementos que estão na forma de cátions, como o Cd, tendem a ficar retidos e os que estão na forma de ânions tornam-se mais móveis no solo. No entanto, em pH muito alcalino, esse precipitado pode formar complexo iônico solúvel $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$. Formas aniônicas podem interagir com o Cd formando complexos inorgânicos insolúveis como cloretos (CdCl^+) e sulfatos (CdSO_4) (McLAUGHLIN et al., 2021).

Além disso, a matéria orgânica influencia sua disponibilidade, promovendo a formação de complexos organometálicos estáveis, os quais podem limitar a solubilidade do Cd, e torná-lo menos disponível para as plantas (MOHAMMED et al., 2010; SHAARI et al., 2024). Estudos como o de KWIATKOWSKA-MALINA (2018) demonstram resultados positivos na imobilização do cádmio no solo com a aplicação de matéria orgânica.

2.3 Cádmio na saúde humana

A preocupação com os efeitos do cádmio na saúde humana começou por volta de 1961, quando Schroeder e Balassa observaram uma ligação entre as concentrações de cádmio em fertilizantes fosfatados e o acúmulo de Cd em vegetais. Posteriormente, a doença Itai-Itai (osteomalácia-doença óssea) na província de Toyama, no Japão, foi caracterizada como decorrente da ingestão de arroz contaminado com cádmio, e por volta de 1968, a doença foi declarada pelo governo japonês como resultante da contaminação por cádmio (KOBAYASHI, 1978; NORDBERG, 2009). Anos depois, a Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer classificou o cádmio como cancerígeno (SUHANI et al., 2021).

A concentração de cádmio no corpo humano é quase nula na fase de bebê; no entanto, ao longo dos anos, o cádmio pode ir se acumulando no corpo a partir de fontes alimentares, sendo o arroz, o trigo e as batatas alguns dos principais contribuintes devido ao consumo frequente (VANDERSCHUEREN et al., 2021). Como não há agentes quelantes eficazes para a liberação de Cd, a excreção é muito baixa, resultando no acúmulo desse metal no organismo (SUHANI et al., 2021). Cerca de 60% do cádmio absorvido é depositado no fígado e nos rins, e geralmente a toxicidade do cádmio é derivada da exposição crônica, e fatores como idade, sexo, dieta, condições de saúde, os quais podem impactar a disponibilidade e retenção do cádmio no corpo (SCHAEFER et al., 2020)

A contaminação por Cd induz estresse oxidativo, reduz a ação dos antioxidantes e compromete o sistema imunológico, alterando a quantidade e as funções das células T. Interfere no metabolismo de Mg, Zn, Ca e Fe, impedindo a síntese regular de vitamina D, essencial para a absorção de Ca (SUHANI et al., 2021). O cádmio é transportado do seu local de absorção para o plasma sanguíneo, onde pode estar ligado à proteína albumina, à proteína metalotioneína, sendo filtrado pelos glomérulos dos rins e acumulado nos túbulos renais, podendo causar dano renal (NORDBERG, 2018).

O complexo Cd-metalotioneína é armazenado e decomposto pelos lisossomos, e o cádmio na forma livre é armazenado nas mitocôndrias, que ocasiona disfunção mitocondrial, formação de radicais livres e indução de apoptose (CHUNHABUNDIT, 2016). Considerando esses agravantes para a saúde humana, a Food and Agriculture Organization (FAO) e a Organização Mundial das Nações Unidas (OMS), através do Comitê Conjunto de Especialistas em Aditivos Alimentares (JECFA), estabeleceram um limite de ingestão tolerável de Cd para o organismo, sendo cerca de 25 µg/kg de peso corporal.

2.4 Cádmio nas plantas

Devido à sua alta mobilidade, o cádmio (Cd) é facilmente absorvido pelas plantas e pode acumular-se em quantidades significativas em órgãos específicos dos vegetais, ocasionando danos ao sistema fotossintético, ao metabolismo oxidativo e à expressão gênica, além de afetar a estrutura celular e radicular (DE ARAÚJO et al., 2017).

Em geral, a presença do Cd nas plantas afeta processos fisiológicos e bioquímicos, interferindo na fotossíntese e na respiração. O crescimento das plantas é afetado pela substituição de íons de Cd no lugar de elementos essenciais ao o metabolismo vegetal, reduzindo a síntese de clorofila e afetando a fotossíntese (SHAARI et al., 2024). O cádmio provoca ainda a diminuição do comprimento das raízes atribuída à menor atividade mitótica das células meristemáticas (ISMAEL et al., 2019). Nas folhas, os sintomas de toxicidade por Cd incluem clorose, que está relacionada com a degradação da clorofila, deixando as folhas com aspecto amarelo-claro ou branco-amarelado. Outro aspecto da toxicidade por cádmio é a necrose, caracterizada pela morte ou deterioração de tecidos e células vegetais.

O cádmio pode se ligar a grupos tiol e carboxil de proteínas e enzimas, afetando a sua função ao substituir íons essenciais (HUYBRECHTS et al., 2019). De forma indireta, pode induzir a formação de espécies reativas de oxigênio (EROS), por meio de diversos mecanismos, nos quais pode substituir o ferro nas proteínas e, assim, aumentar o nível de Fe livre na célula. Pode levar ao esgotamento da glutatona (GSH), devido ao aumento da síntese de fitoquelatina que contribui para a quelação do Cd, enquanto reduz a quantidade de GSH disponível para a defesa antioxidante (HUYBRECHTS et al., 2019).

2.4.1 Absorção, transporte e acúmulo de cádmio em plantas

A dinâmica do cádmio nas plantas inclui a absorção pelo sistema radicular, o carregamento e o transporte pelo xilema, a translocação para o floema, a redistribuição entre caules e folhas e, por fim, o acúmulo nos grãos (URAGUCHI et al., 2011). O cádmio pode entrar nas células das raízes na forma de íon livre Cd^{2+} e ser transportado na forma de compostos quelantes (metal orgânico). A entrada nas células radiculares envolve transportadores de íons, responsáveis por mover o Cd^{2+} para o interior das

células (LUX et al., 2011). As plantas não possuem transportadores específicos ou seletivos para o Cd, sua entrada ocorre por meio de transportadores de cálcio (Ca), ferro (Fe), magnésio (Mg), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn) (CLEMENS, 2006). Além disso, existem canais iônicos que não possuem seletividade para cátions, podendo transportar todos os cátions, incluindo o Cd^{2+} (LUX et al., 2011).

O cádmio também pode ser transportado por meio de proteínas da família ZIP, caracterizadas por sua atuarem no transporte de metais do espaço extracelular e do lúmen para o citoplasma (ZHENG et al., 2018; ISMAEL et al., 2019). Outros transportadores da família Yellow Stripe-Like (YSL) desempenham papel no transporte de complexos metal-nicotianamina, sugerindo que, quando o Cd está complexado, ele pode ser absorvido pelas proteínas YSL (CURIE et al., 2008; ISMAEL et al., 2019). Além disso, proteínas associadas à resistência natural de macrófagos (NRAMPs) também podem estar envolvidas no transporte de Cd, tendo sido relatadas em *Arabidopsis thaliana* (THOMINE et al., 2000), *Oryza sativa* (SASAKI et al., 2012) e *Nicotiana tabacum* (TANG et al., 2017). Em *Theobroma cacao*, o gene TcNRAMP5 foi identificado como um dos responsáveis pela captação de Cd^{2+} (ULLAH et al., 2018).

De forma geral, o acúmulo de cádmio nas plantas pode ocorrer por translocação direta ou por realocação de depósitos em tecidos vegetativos. No caso do cacaueteiro, possivelmente a via direta seria a translocação do cádmio nas raízes e galhos pelo xilema, enquanto a segunda via seria a realocação de estoques vegetativos, como as folhas (BLOMMAERT et al., 2024). No estudo de BLOMMAERT et al. (2024), observou-se que o Cd absorvido pelas raízes do cacaueteiro é rapidamente transportado para o xilema e, em seguida, para a parte aérea da planta, onde se acumula principalmente no caule. Além disso, os autores relataram que a presença de Cd nas folhas em desenvolvimento foi resultante da realocação via floema dos caules, em vez da absorção direta das raízes através do xilema. Por outro lado, de ARAÚJO et al. (2017), observaram que o Cd foi absorvido pelo sistema radicular e acumulou-se igualmente em todos os órgãos do cacaueteiro, ressaltando a alta taxa de translocação.

2.4.2 Mitigação de cádmio com elementos minerais

Dentre os elementos químicos que vêm sendo estudados como mitigadores dos efeitos tóxicos do cádmio, destacam-se o silício (Si), o zinco (Zn), o manganês (Mn) e o selênio (Se). O silício é um elemento que contribui para reduzir os danos às estruturas

celulares causados por estresses abióticos e bióticos (POOJA et al., 2022). Em relação à toxicidade do cádmio, estudos relatam que o silício forma uma barreira física por meio da deposição de células silicosas, reduzindo a absorção e o transporte de cádmio (MA & YAMAJI, 2008). Ademais, as modificações estruturais decorrentes da deposição de silício podem fornecer locais adicionais de ligação para o cádmio (LIU et al., 2013a). GUO et al. (2018) demonstraram que a aplicação de silício atenuou as alterações induzidas pelo cádmio nos cloroplastos. Em plantas de *Cucumis sativus* L. (pepino), o silício reduziu o acúmulo de Cd nas folhas, preservou as estruturas do cloroplasto e estimulou a síntese de clorofila (FENG et al., 2010).

Além desses efeitos, o silício inibe a expressão de genes relacionados à captação de cádmio. Em arroz, observou-se que o silício regula negativamente a expressão da proteína transportadora NRAMP5, responsável pela absorção de cádmio (BISWAS et al., 2023). Essa proteína é expressa na zona de maturação da raiz, e sua presença também foi relatada em *Theobroma cacao* (ULLAH et al., 2018).

Outro elemento relevante na mitigação de cádmio é o zinco. Devido à similaridade química entre esses elementos, o cádmio compete com o Zn pelos canais transportadores de cátions. Entretanto, a afinidade desses transportadores é maior pelo zinco (QIAN et al., 2023). Em *Theobroma cacao*, SANTOS et al. (2020) observaram redução na absorção de Cd pelas folhas com o aumento da concentração de Zn. Da mesma forma, QIAN et al. (2023) reportaram aumento nos teores de Zn nos grãos e redução no acúmulo de Cd.

O manganês (Mn) também tem demonstrado ser eficaz na mitigação dos efeitos do cádmio nas plantas. Esse micronutriente possui um papel crucial na fotossíntese, participando do complexo de oxidação da água no fotossistema II, processo responsável pela liberação de elétrons indispensáveis à cadeia de transporte de elétrons (WHITE & GREENWOOD, 2013). Estudos com uma herbácea (*Phytolacca americana*) (PENG et al., 2008), cevada (*Hordeum vulgare*) (WU et al., 2003) e cacau (MACHADO et al., 2020) (genótipo CCN 51) demonstraram que a aplicação de Mn reduziu significativamente as concentrações de Cd nos tecidos vegetais. No genótipo CCN 51, essa mitigação foi acompanhada de aumento no teor de proteínas e de indução de proteínas relacionadas aos mecanismos de desintoxicação.

Esses resultados reiteram que a absorção de um elemento pode ser modulada na presença de outro, especialmente considerando a semelhança química entre eles (SANTOS et al., 2020). Nesse contexto, o selênio também tem despertado interesse

como um potencial agente mitigador de cádmio, devido às suas propriedades antioxidantes, conforme tem sido observado em estudos recentes.

2.5 Aspectos gerais do selênio

O selênio é um elemento encontrado naturalmente em piritas de cobre, ferro, minérios de sulfeto de cobre, chumbo, níquel, ouro e petróleo. No solo, sua presença é derivada principalmente da erosão de rochas que contêm selenitos e selenatos. Está presente na forma inorgânica de selenato (SeO_4^{2-}) e selenito (SeO_3^{2-}) e na forma orgânica de selenocisteína (SeCys) e selenometionina (SeMet) (SURAI et al., 2018).

Em ambientes alcalinos, o selenito tende a se tornar selenato solúvel, prontamente assimilável pelas plantas. Em contrapartida, em solos ácidos, o selenito geralmente se liga a hidróxidos de ferro, sendo retido no solo (STADBLOER et al., 2001; MEHDI et al., 2013). Embora o selênio não seja considerado um elemento essencial para as plantas, sua incorporação pode fornecer benefícios, como promover o crescimento e desenvolvimento vegetal, ajudar a combater estresse biótico e abiótico e reduzir os efeitos de elementos potencialmente tóxicos, como o cádmio.

Na saúde humana, o selênio é um mineral fundamental que compõe proteínas reconhecidas por sua atuação no sistema antioxidante e como agente catalisador na síntese de hormônios tireoidianos. A bioacessibilidade desse mineral é encontrada em certos alimentos, como pães, cereais, nozes, carnes e peixes, onde o selênio é encontrado principalmente na forma de selenometionina, que corresponde a cerca de 90% do selênio (RAYMAN, 2000).

A deficiência de selênio no metabolismo humano pode desencadear diversos problemas no organismo, impactando desde o desenvolvimento fetal até a eficácia do sistema imunológico. Essas implicações estão associadas às funções vitais das selenoproteínas no corpo. O selênio, quando incorporado na forma de selenocisteína, desempenha papéis cruciais na síntese de proteínas como peroxidase da glutathione, selenoproteína-P, desidases da iodotironina e redutase da tioredoxina.

A peroxidase da glutathione possui oito proteínas homólogas conhecidas (GPx1 a GPx8), responsáveis por neutralizar o peróxido de hidrogênio nos compartimentos intracelulares e extracelulares, proteger contra danos oxidativos, atuar como barreira contra a absorção de hidroperóxidos derivados de produtos alimentares e contribuir para a fertilidade masculina (MEHDI ET al., 2013). A selenoproteína-P possui propriedade

antioxidante e protege as células endoteliais vasculares dos danos oxidativos (HARA et al., 2001). As desidases da iodotironina estão envolvidas na regulação dos hormônios da tireoide ao catalisarem a desidatação, enquanto as redutases da tioredoxina estão envolvidas na redução de dissulfetos e peróxidos na célula (ARNÉR & HOLMGREN, 2000).

2.6 Selênio nas plantas

O selênio pode penetrar nas células das raízes na forma de selenato e selenito, sendo que o selenato é a forma mais biodisponível no solo (WHITE, 2018). Primeiramente este deve ser reduzido a selenito com auxílio das enzimas ATP sulfurilase (APS) e APS redutase (APR), posteriormente a selenito pela enzima glutatona, para poder ser transportado e acumulado (KHAN et al., 2023; SORS et al., 2005).

O selenito pode ser absorvido nas raízes através de transportadores de fosfato ou aquaporinas pertencentes à família PHT1 e acumulado nas raízes como organo-selênio (LI et al., 2008). Quanto ao selenato, a sua captação ocorre por meio de Sultrs (3;1-3;5), o influxo para as raízes é mediado por transportadores H⁺/Sulfato de alta afinidade Sultr1;1, Sultr1;2 e Sultr1;3 (LI et al., 2008), o carregamento no xilema é através de Sultr2;1 e Sultr3;5, e por fim os Sultrs 4;1 e 4;2 auxiliam o efluxo de selenato no vacúolo (TRIPPE & SMITH, 2021). Na sua forma orgânica é transportado para a parte aérea através do xilema (HUANG et al., 2017). Quando translocado para as folhas e metabolizado nos plastídios, o Se resulta em SeCys ou SeMet. A partir destes, as plantas são capazes de sintetizar compostos voláteis como dimetilsulfeto (DMS) e dimetilseleneto (DMSe) (TRIPPE & SMITS, 2021).

Diversos estudos mostram que a aplicação de selênio tem efeitos positivos no crescimento e desenvolvimento das plantas, como aumento do crescimento de tubérculo de batata (*Solanum tuberosum* L.) (TURAKAINE et al., 2004), aumento do peso seco da parte aérea e da raiz em tomate (*Solanum lycopersicum* L.) (ALYEMENI et al., 2018), e melhoria do crescimento de erva-cidreira (*Melissa officinalis* L.) (TAVAKOLI et al., 2020).

Outros estudos com a herbácea aromática *Satureja hortensis* L. (AZIZI et al., 2020), trigo (*Triticum turgidum* L.) (ZHOU et al., 2021), noqueira (*Juglans regia* L.) (WANG et al., 2022) e arroz (*Oryza sativa* L.) (HUANG et al., 2024) ressaltam o efeito

positivo do selênio na redução do acúmulo de Cd e na proteção contra danos oxidativos. Os benefícios do Se contra estresse biótico podem resultar da combinação de efeitos diretos e indiretos, pois o dimetilseleneto, um composto volátil expelido pelas plantas, pode deter herbívoros, e o selênio acumulado nas plantas é prejudicial a herbívoros e patógenos (KHAN et al., 2023).

No que se refere ao estresse abiótico, o selênio é frequentemente descrito como um agente protetor, pois pode minimizar danos à membrana celular, melhorar o aparelho fotossintético e favorece a atividade do sistema antioxidante. O selênio possui grande relevância no metabolismo vegetal por aumentar a atividade de enzimas antioxidantes e combater o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), minimizando os danos às membranas (LIU et al., 2022). O excesso de EROs nas células vegetais pode ocasionar danos oxidativos às membranas e interromper a respiração e a fotossíntese (NADARAJAH et al., 2020).

Em plantas de milho (*Z. mays*), de morango (*Fragaria ananassa* Duch.) e da herbácea *S. hortensis*, submetidas a estresses salinos, temperaturas extremas, seca e elementos-traço, respectivamente, foi observado que a aplicação de selênio aumentou a atividade de enzimas antioxidantes e auxiliou no combate aos danos oxidativos (JIANG et al., 2017; HUANG et al., 2018; AZIZI et al., 2020). Em relação à atuação do selênio como mitigador de cádmio, os estudos ressaltam que o Se age como antagonista em relação a elementos fitotóxicos como o Cd, minimizando o acúmulo na planta (GAO et al., 2018). Os efeitos do Se em plantas sob estresse de cádmio, que estão sendo relatados, incluem o aumento de substâncias antioxidantes enzimáticas e não enzimáticas (GSH), responsáveis por remover radicais livres que se encontram em excesso, e a formação de complexo CdSe nas raízes, restringindo a disponibilidade e translocação de Cd.

WANG et al. (2022) observaram que a aplicação foliar de Se aumentou a atividade das enzimas antioxidantes catalase (CAT) e peroxidase (POD) e reduziu o acúmulo de cádmio em mudas de nogueira. Em genótipos de tomate, LIMA et al. (2019) observaram restrição de cádmio da raiz para a parte aérea com aplicação de selênio. Além disso, os frutos apresentam maior concentração de Mn e Fe, demonstrando que a aplicação com Se não apenas minimiza a absorção de cádmio como tende a melhorar aspectos nutricionais.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito da aplicação foliar de selênio no genótipo CCN51 de *T. cacao*, em solo contaminado com cádmio.

3.2 Objetivos Específicos

Analisar parâmetros fisiológicos das plantas de *T. cacao* submetidas à presença de Cd no solo. Analisar o estado nutricional das plantas na presença de Cd.

Quantificar o teor de cádmio e selênio das plantas de *T. cacao*.

Quantificar o teor de cádmio no solo das plantas de *T. cacao*.

Quantificar enzimas antioxidantes nas plantas de *T. cacao* submetidas à presença de Cd

4 HIPÓTESE

A aplicação foliar de selênio reduz os efeitos tóxicos do cádmio em mudas de *T. cacao*.

A aplicação foliar de selênio reduz o teor de cádmio em plantas de *T. cacao*

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área da pesquisa

O projeto foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal de Lavras. As mudas de cacauzeiro foram obtidas por doação do Instituto Biofábrica da Bahia (Ilhéus, Bahia) e transportadas para o município de Lavras.

Inicialmente, as plantas de cacauzeiro foram colocadas em vasos contendo substrato comercial e mantidas em casa de vegetação, com irrigação diária. Em paralelo, foi realizada a correção do pH de parte do solo, utilizando uma mistura de CaCO_3 e MgCO_3 na proporção de 3:1 e mantida em casa de vegetação por cerca de 30 dias. Após esse período, foram colocados 4 kg de Latossolo vermelho-Amarelo (Tabela 1) em vasos de 5 L e foi realizado o transplante das mudas de cacau.

Tabela 1. Propriedades físicas e químicas do Latossolo Vermelho-Amarelo (0-20 cm¹) antes da calagem e da adubação.

Latossolo Vermelho-Amarelo		
Atributo	Unidade	Valor
Propriedades físicas		
Argila	g kg ⁻¹	239
Silte	g kg ⁻¹	45
Areia grossa	g kg ⁻¹	231
Areia fina	g kg ⁻¹	485
Propriedades químicas		

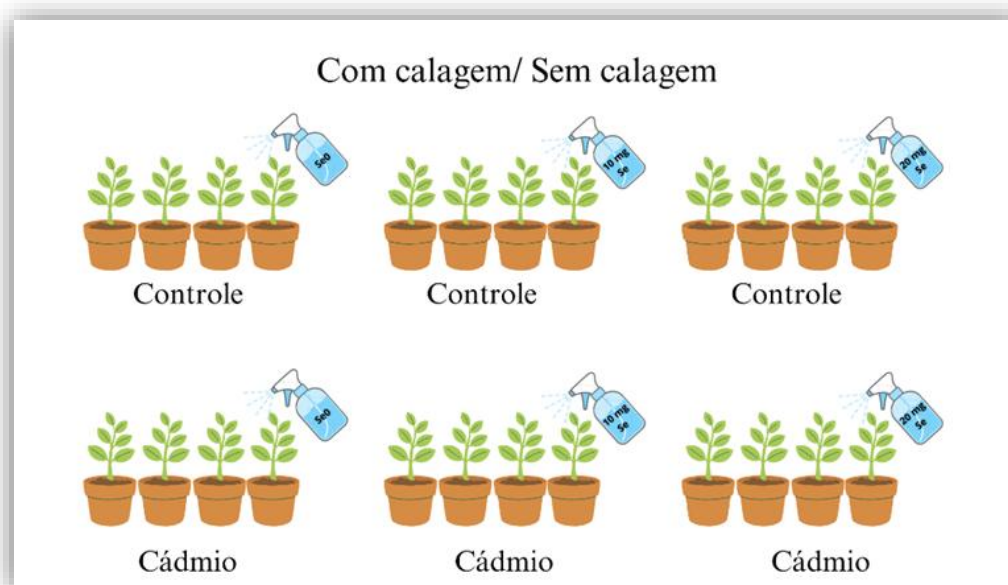
pH (H ₂ O)	-	4,35 ± 0,06
Matéria orgânica	dag kg ⁻¹	0,81 ± 0,04
P	mg dm ⁻³	1,15 ± 0,10
P-Rem	mg L ⁻¹	35,37 ± 0,89
K	mg dm ⁻³	6,95 ± 0,46
Zn	mg dm ⁻³	0,25 ± 0,03
Fe	mg dm ⁻³	58,8 ± 0,99
Mn	mg dm ⁻³	3,52 ± 0,06
Cu	mg dm ⁻³	0,91 ± 0,02
B	mg dm ⁻³	0,09 ± 0,01
S	mg dm ⁻³	5,57 ± 0,17
Ca	cmol _c dm ⁻³	0,27 ± 0,05
Mg	cmol _c dm ⁻³	0,34 ± 0,01
Al	cmol _c dm ⁻³	0,30 ± 0,01
Acidez potencial	cmol _c dm ⁻³	5,00 ± 2,17
CTC	cmol _c dm ⁻³	0,93 ± 0,05
SB	%	14,86 ± 3,45
m	%	33,04 ± 2,83

5.2 Delineamento experimental

O experimento foi realizado em delineamento em blocos casualizados (DBC), com esquema fatorial de 2 x 3, com quatro repetições. Os fatores correspondem a dois níveis de cádmio: um sem adição de Cd (-Cd) e outro contaminado com 13 mg kg⁻¹ de Cd (+Cd), utilizando o Cd(NO₃)₂ como fonte, e a três doses de selênio aplicadas via foliar: 0 mg L⁻¹ (0 mg planta⁻¹), 10 mg L⁻¹ (0,05 mg planta⁻¹) e 20 mg L⁻¹ (0,1 mg planta⁻¹), utilizando o Na₂SeO₄ como fonte.

Essa estrutura experimental foi conduzida de forma independente, sob duas condições de solo: solo natural (sem calagem) e solo com pH corrigido (com calagem), totalizando 48 plantas, sendo 24 com calagem e 24 sem calagem. A calagem não foi incluída no modelo fatorial para permitir a avaliação isolada dos efeitos do cádmio e do selênio em cada cenário de acidez do solo.

Figura 1. Desenho experimental: Plantas em solo com calagem e sem calagem cultivadas em solo contaminado com cádmio.



Fonte: elaboração própria

Para a condução do estudo, 4 kg de solo foram acondicionados em vasos com capacidade de 5 L, procedendo-se o transplântio das mudas de cacaueiro e realizando-se a adubação das plantas conforme as recomendações técnicas para a cultura, de acordo com CHEPOTE et al. (2013). Cinco dias após, foi realizada a aplicação de $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$, e após esse período, o experimento foi dividido em dois procedimentos principais: aplicação foliar de selênio e avaliações fisiológicas.

5.3 Aplicação foliar de selênio

A aplicação foliar de selênio foi realizada em quatro momentos, com intervalo de quinze dias entre cada aplicação. As concentrações aplicadas foram de 0, 10 e 20 mg L^{-1} de Se, no volume de 5 mL, utilizando pulverização manual direcionada à superfície foliar das plantas. As aplicações subsequentes seguiram o mesmo intervalo de tempo, totalizando quatro aplicações ao longo do experimento.

5.4 Avaliações fisiológicas

Nas avaliações fisiológicas foram mensurados os parâmetros de trocas gasosas e clorofilas. Os índices de clorofila *a* e clorofila *b* foram estimados com auxílio de um ClorofiLOG portátil CFL1030 (Falker Automação Agrícola Ltda., Porto Alegre, RS). As variáveis de transpiração (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e taxa de assimilação líquida de CO_2 (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foram medidas

por meio de um analisador de gases infravermelho (IRGA) (Lcpro, ADC Bioscientific Ltd., UK). As medições foram realizadas dez dias após cada aplicação de selênio, de forma a monitorar os efeitos das doses sobre o desempenho fisiológico.

5.5 Enzimas antioxidantes

Ao final do experimento, foi realizada a coleta dos tecidos vegetais e congelados em nitrogênio líquido, visando às análises das enzimas catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX),

Para quantificação da atividade das enzimas CAT) e APX, cerca de 0,2 g do tecido foliar foi macerado em nitrogênio líquido com 2% de polivinilpolipirrolidona (PVPP). Após, foram adicionados 1,50 mL de meio de extração composto por: 375 μ L de tampão fosfato de potássio 400 mM (pH 7,8), 15 μ L de EDTA 10 mM, 75 μ L de ácido ascórbico 200 mM e 1035 μ L de água. O extrato foi centrifugado a 13.000 g por 10 minutos a 4 °C e o sobrenadante coletado e armazenado a -20 °C durante o período das análises (BIEMELT et al., 1998).

A atividade da CAT foi quantificada, segundo (HAVIR; MCHALE, 1987), em que uma alíquota de 5 μ L do extrato enzimático foi adicionada a 180 μ L do meio de incubação, contendo 90 μ L de fosfato de potássio 200 mM (pH 7,0), 9 μ L de peróxido de hidrogênio 250 mM e 71 μ L de água, incubado a 28 °C. A atividade dessa enzima foi determinada pelo decréscimo na absorbância, a 240 nm, a cada 15 s, por 3 min, monitorado pelo consumo de peróxido de hidrogênio. O coeficiente de extinção molar utilizado foi 6 mM⁻¹ cm⁻¹.

A atividade da APX foi determinada pelo acompanhamento da taxa de oxidação do ascorbato a 290 nm, a cada 15 s, por 3 min. Uma alíquota de 5 μ L do extrato enzimático foi adicionada a 180 μ L de tampão de incubação, composto por 90 μ L de fosfato de potássio 200 mM (pH 7,0), 9 μ L de ácido ascórbico 10 mM, 9 μ L de peróxido de hidrogênio 2 mM e 62 μ L de água (NAKANO; ASADA, 2018). O coeficiente de extinção molar utilizado será 2,8 mM⁻¹ cm⁻¹ (BIEMELT; KEETMAN; ALBRECHT, 1998).

5.6 Análises de determinação de cádmio e selênio

Para a quantificação de cádmio, as amostras do solo e material vegetal (folhas) foram coletadas ao final do experimento. As quais foram digeridas em micro-ondas

conforme o método USEPA 3051A (USEPA, 1998) utilizando um sistema de digestão por micro-ondas CEM1 Mars-5 (Matthews, NC, EUA). Para o material vegetal, uma alíquota de 0,1 g da amostra de planta foi combinada com 1 mL de HNO_3 e 2 mL de H_2O_2 em ecipientes de politetrafluoroetileno (Teflon), sendo submetida a uma pré-digestão por 30 minutos e posteriormente, digeridas por 10 minutos no micro-ondas. Para o solo, utilizou-se 0,1 g de amostra combinada com 2 mL de HNO_3 , seguindo o mesmo protocolo de pré-digestão (30min) e digestão (10min). A extração do cádmio disponível no solo foi realizada utilizando-se a solução de Mehlich-1. Por fim, os teores de cádmio nas soluções digeridas foram determinados através de Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS). Todos os reagentes utilizados foram de alta pureza (Sigma–Aldrich® e Merck®).

5.7 Análises de determinação nutricional

A extração dos nutrientes fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn) e boro (B) foram realizadas através do mesmo método utilizado para cádmio e selênio, e a leitura dos teores foram por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES).

5.8 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk; posteriormente, foram submetidos à ANOVA, e a significância estatística das médias foi comparada pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), utilizando o software estatístico SISVAR® (FERREIRA, 2011), e os gráficos foram elaborados por meio do programa SigmaPlot, versão 15.0.

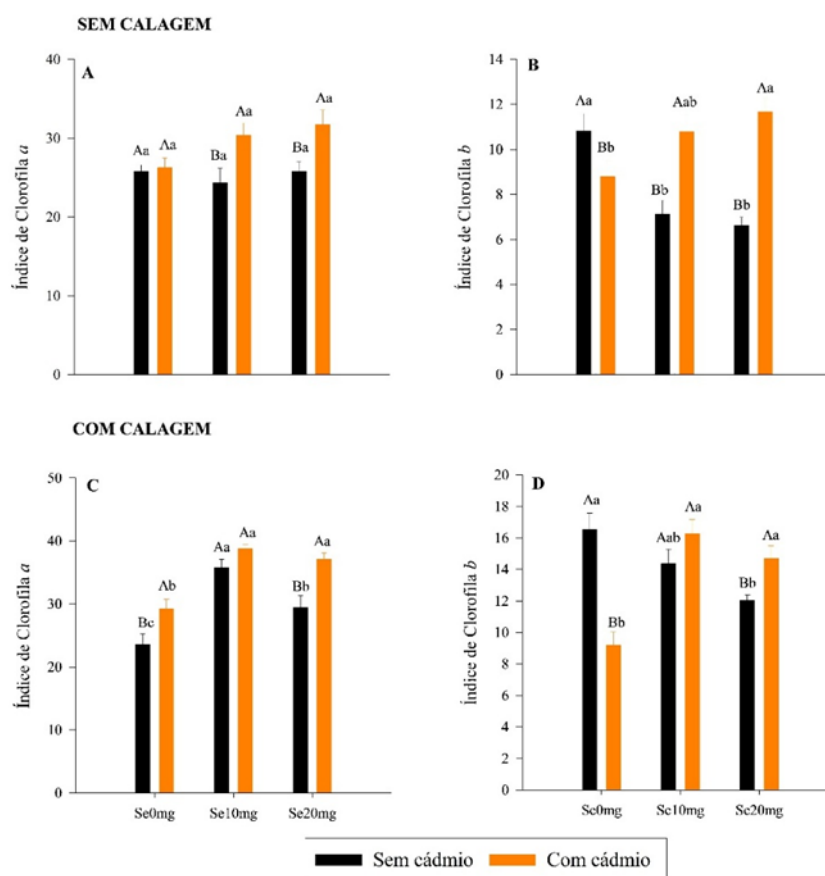
6 RESULTADOS

6.1 Índice de clorofila

O cádmio diminuiu o índice de Chl b em relação as plantas sem cádmio (-Cd) na ausência de selênio, em ambas as condições de solo, sem e com calagem (Figura 2A, 2B e 2C), sendo esse efeito mais pronunciado no solo com calagem (Figura 2D). Quando o Se foi aplicado via foliar (doses de 10 e 20 mg L^{-1}), observou-se uma recuperação do índice de Chl b das plantas com cádmio (+Cd). Por outro lado, na ausência de cádmio,

as plantas tratadas com Se apresentaram redução no índice de Chl b. Para a Chl a, não foi observada redução em resposta ao Cd, enquanto os efeitos positivos do selênio puderam ser observados nas plantas crescidas no solo com calagem (Figura 2C).

Figura 2. Índice de clorofilas a e b em plantas de cacaueteiro crescidas em solo sem calagem (A, B) e com calagem (C, D) submetidas aos tratamentos sem Cd (barra preta) e com adição de Cd (barra laranja) e diferentes doses de Se aplicadas via foliar. Médias seguidas de letras maiúsculas representam diferenças entre os tratamentos de Cd e médias seguidas de letras minúsculas representam diferenças entre as doses de Se (Teste de Tukey a 5% de probabilidade).



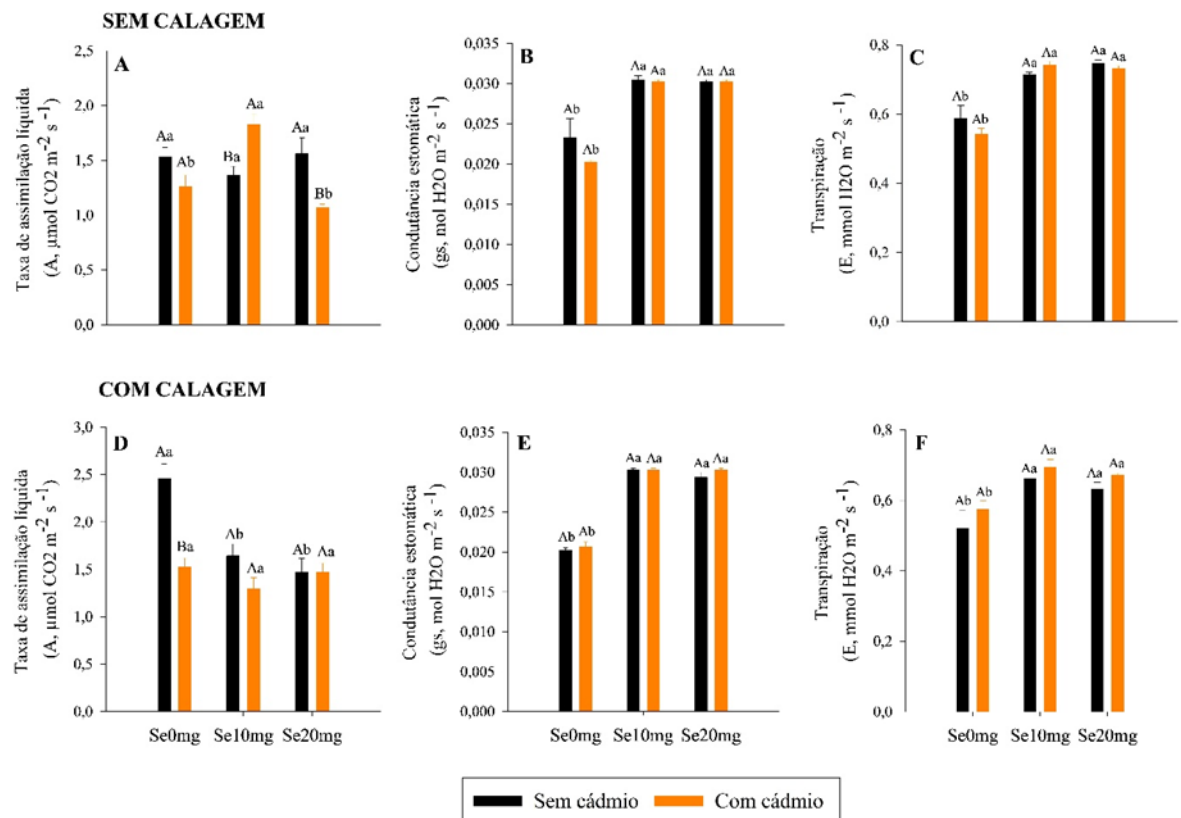
6.2 Trocas gasosas

O cádmio reduziu a taxa de assimilação líquida de CO₂ em 38,0% apenas em plantas crescidas em solo com calagem (Figura 3D). Embora uma tendência de redução tenha sido observada no tratamento sem calagem (Figura 3A), o efeito não foi significativo. A aplicação de selênio não foi suficiente para recuperar a fotossíntese nas plantas com calagem (Figura 3D). Por outro lado, observou-se um efeito positivo do selênio nas plantas crescidas no solo sem calagem e com cádmio, especificamente na dose na dose de 10 mg L⁻¹ (Figura 3A).

Em relação à condutância estomática e à transpiração, a presença isolada de cádmio não reduziu significativamente essas variáveis, mas a aplicação de Se promoveu

maiores valores de g_s e E em ambas as condições de solo, independentemente da presença de Cd (Figuras 3B, 3C, 3E e 3F).

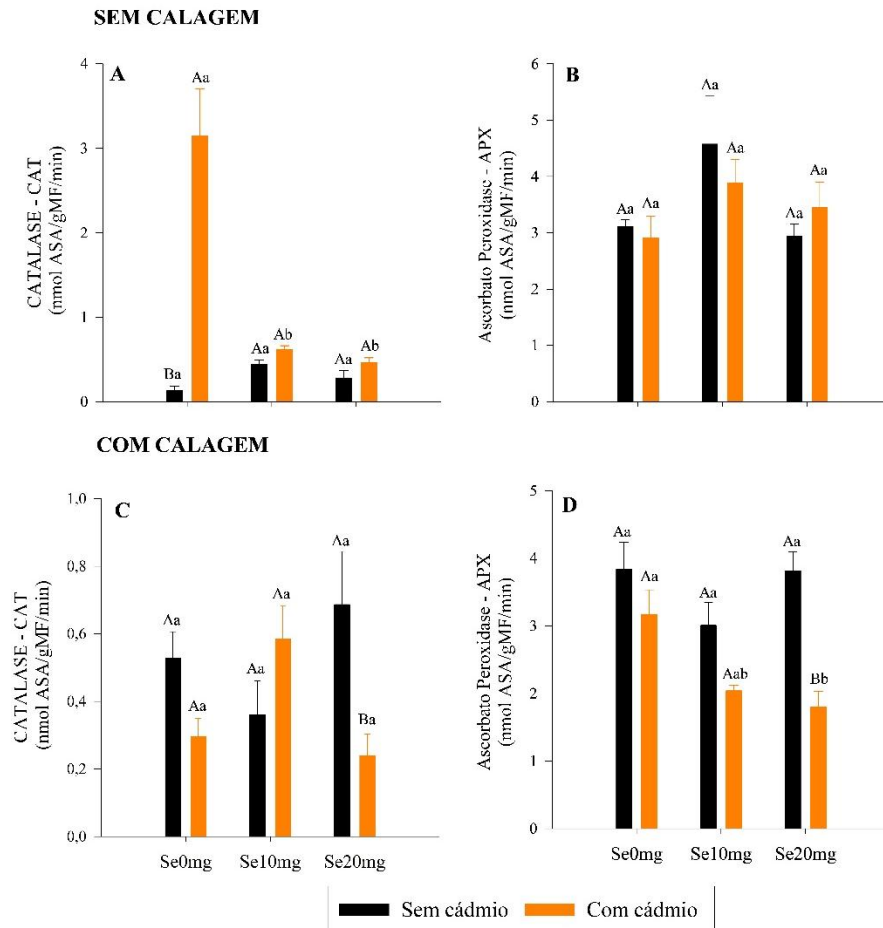
Figura 3. Trocas gasosas de plantas de cacauero crescidas em solo sem calagem (A, B, C) e com calagem (D, E, F) submetidas aos tratamentos sem Cd (barra preta) e com adição de Cd (barra laranja) e diferentes doses de Se aplicadas via foliar. Médias seguidas de letras maiúsculas representam diferenças entre os tratamentos de Cd e médias seguidas de letras minúsculas representam diferenças entre as doses de Se (Teste de Tukey a 5% de probabilidade).



6.3 Enzimas antioxidantes

A presença do cádmio elevou expressivamente a atividade da enzima catalase apenas nas plantas crescidas no solo sem calagem, enquanto a aplicação foliar de Se manteve a atividade dessa enzima baixa (Figura 4A). Por outro lado, no solo com calagem, apesar da tendência da aplicação de 10 mg L^{-1} de Se aumentar a atividade da CAT nas plantas com cádmio, o efeito não foi significativo (Figura 4C). Quanto a enzima ascorbato peroxidase, o cádmio não teve efeito sobre a atividade dessa enzima em relação a -Cd sem Se, em ambas as condições do solo (Figura 4B e 4D). Contudo, a aplicação de Se de 20 mg L^{-1} aumentou a APX nas plantas -Cd e reduziu nas plantas +Cd, apenas no solo com calagem (4D).

Figura 4. Atividade enzimática de plantas de cacauero crescidas em solo sem calagem (A e B) e com calagem (C e D) submetidas aos tratamentos sem Cd (barra preta) e com adição de Cd (barra laranja) e diferentes doses de Se aplicadas via foliar. Médias seguidas de letras maiúsculas representam diferenças entre os tratamentos de Cd e médias seguidas de letras minúsculas representam diferenças entre as doses de Se (Teste de Tukey a 5% de probabilidade).



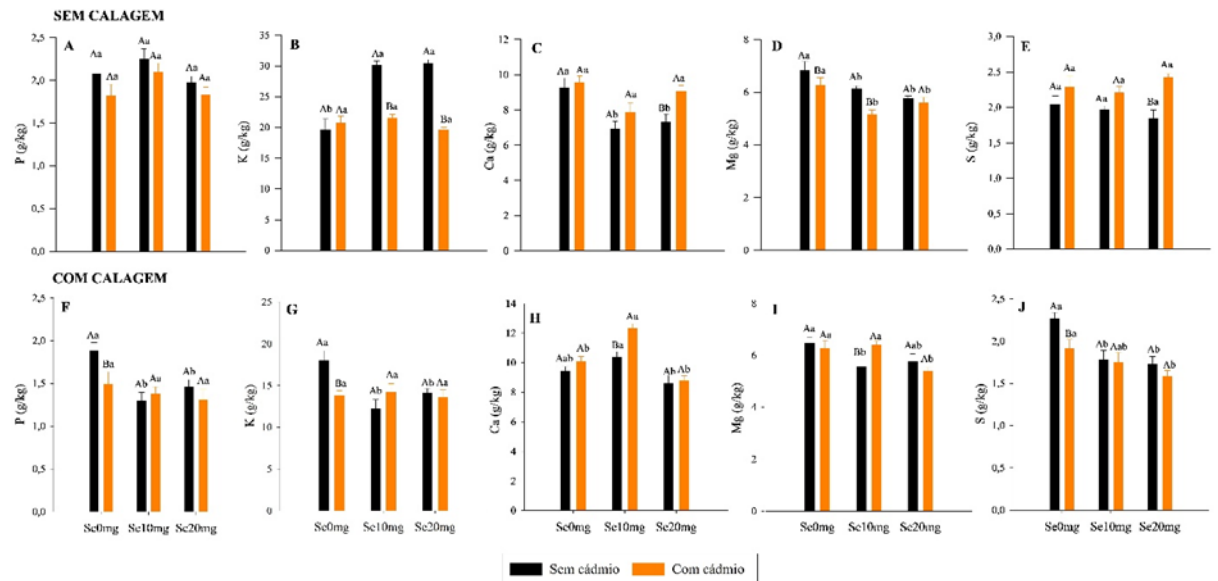
6.4 Macronutrientes

No solo sem calagem, a presença do cádmio afetou negativamente o teor foliar de Mg em relação ao -Cd sem Se (Figura 5D). A aplicação foliar de Se reduziu o teor desse nutriente tanto nas plantas -Cd e +Cd (Figura 5D). Quanto ao teor de K, as doses 10 e 20 mg L⁻¹ estimularam um aumento significativo no teor foliar das plantas -Cd (Figura 5B). Em contrapartida, as aplicações de Se causaram redução no teor de Ca nas plantas -Cd (Figura 5C).

No solo com calagem, os teores de fósforo, potássio enxofre foram afetados negativamente nas plantas com cádmio comparada a -Cd sem aplicação de Se (Figuras 5F, 5G e 5J). As aplicações foliares de Se ocasionaram uma redução nos teores de P, K

e S nas plantas sem cádmio. Em contrapartida, nas plantas com cádmio a aplicação de Se não promoveu diferenças significativas.

Figura 5. Teor de macronutrientes de plantas de cacauero crescidas em solo sem calagem (A, B, C, D, E) e com calagem (F, G, H, I, J) submetidas aos tratamentos sem Cd (barra preta) e com adição de Cd (barra laranja) e diferentes doses de Se aplicadas via foliar. Médias seguidas de letras maiúsculas representam diferenças entre os tratamentos de Cd e médias seguidas de letras minúsculas representam diferenças entre as doses de Se (Teste de Tukey a 5% de probabilidade).

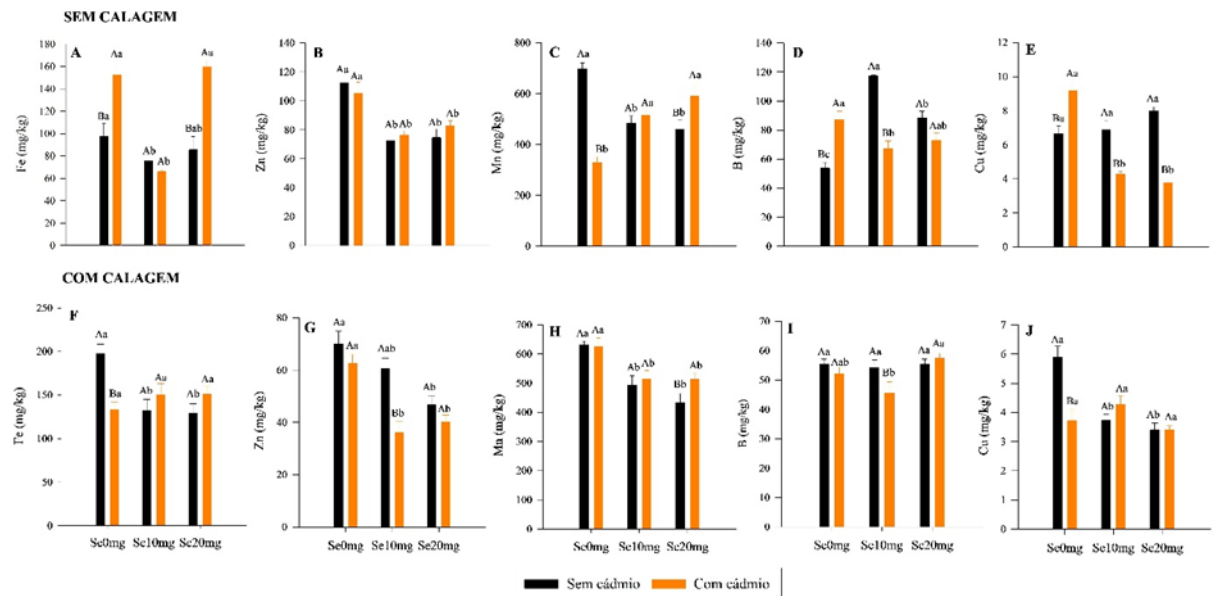


6.5 Micronutrientes

O cádmio afetou significativamente o teor foliar de Fe, enquanto nas plantas crescidas no solo sem calagem o teor foi maior em resposta ao cádmio e sem Se, no solo com calagem o teor foi menor (Figura 6A e 6F). A aplicação de 10 mg L⁻¹ de Se diminuiu o teor de Fe nas plantas +Cd, contudo, a dose de 20 mg L⁻¹ elevou novamente esse teor (Figura 6A). Já no solo com calagem, as aplicações de Se reduziram o teor de Fe apenas nas plantas -Cd (Figura 6F).

Para o boro e o cobre no solo sem calagem, os teores foram superiores nas plantas com cádmio na ausência de Se, e a aplicação de Se reduziu significativamente os teores desses nutrientes nessas plantas (Figuras 6D e 6E). Por outro lado, no solo com calagem, a aplicação de Se reduziu o teor de Cu nas plantas -Cd e promoveu decréscimo no teor de Mn em as ambas condições (-Cd e +Cd). Quanto ao Zn, as aplicações de Se provocaram quedas nos teores foliares nas plantas crescidas no solo sem calagem e com calagem (Figuras 6B e 6G) sendo que a redução ocorreu igualmente nas plantas -Cd e +Cd no solo sem calagem (Figura 6G).

Figura 6. Teor de micronutrientes de plantas de cacauero crescidas em solo sem calagem (A, B, C, D, E) e com calagem (F, G, H, I, J) submetidas aos tratamentos sem Cd (barra preta) e com adição de Cd (barra laranja) e diferentes doses de Se aplicadas via foliar. Médias seguidas de letras maiúsculas representam diferenças entre os tratamentos de Cd e médias seguidas de letras minúsculas representam diferenças entre as doses de Se (Teste de Tukey a 5% de probabilidade).



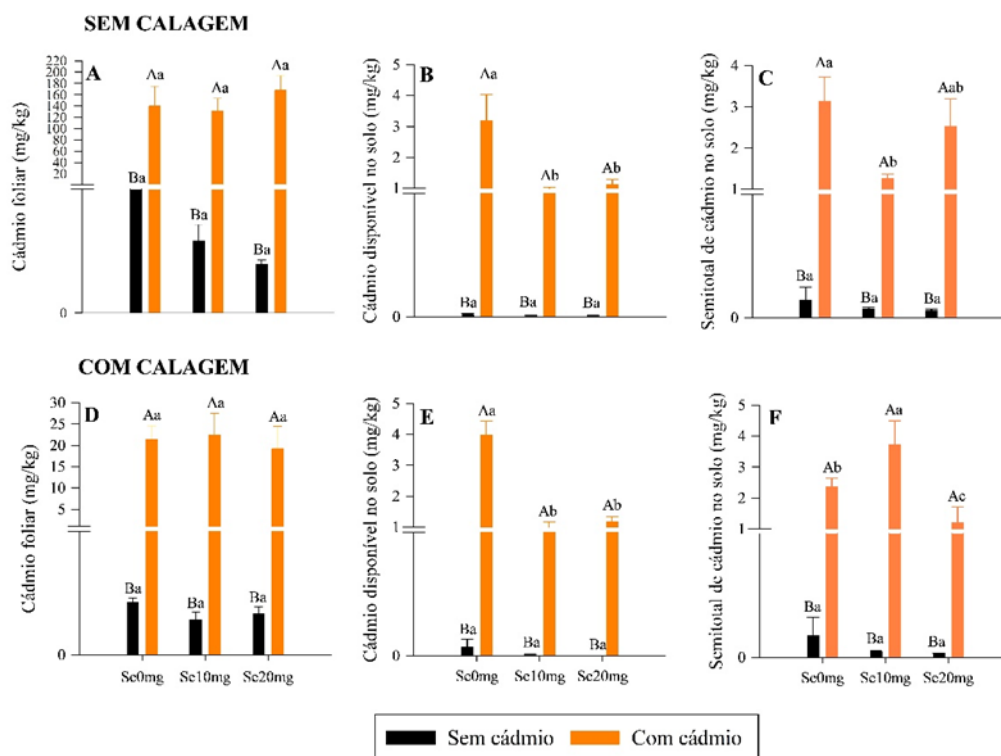
6.6 Cádmio na planta e no solo

As plantas submetidas à aplicação de Cd não apresentaram diferenças significativas no teor de Cd foliar em respostas às doses de Se, comportamento observado em ambas as condições de solo (Figura 7A e 7D).

Quanto ao teores de Cd disponível no solo, a aplicação de Se promoveu reduções significativas nas condições sem e com calagem, concentrando os menores valores em ambas as doses (Figura 7B e 7E). Comportamento distinto foi observado para o teor semitotal de Cd no solo. No solo sem calagem, a dose de 10 mg L⁻¹ reduziu significativamente o teor de Cd no solo (Figura 7C). Por outro lado, no solo com calagem, a aplicação de 10 mg L⁻¹ promoveu um aumento significativo no teor semitotal de Cd, ao passo que a dose de 20 mg L⁻¹ provocou um decréscimo significativo (Figura 7F).

Figura 7. Teor de cádmio foliar (A, D), cádmio disponível (B, E) e semitotal (C, F) de plantas de cacauero crescidas em solo sem calagem (A, B, C,) e com calagem (D, E, F) submetidas aos tratamentos sem Cd (barra preta) e com adição de Cd (barra laranja) e diferentes doses de Se aplicadas via foliar. Médias seguidas de letras maiúsculas representam diferenças entre os tratamentos de Cd e médias seguidas de letras minúsculas representam diferenças entre as doses de Se (Teste de Tukey a 5%

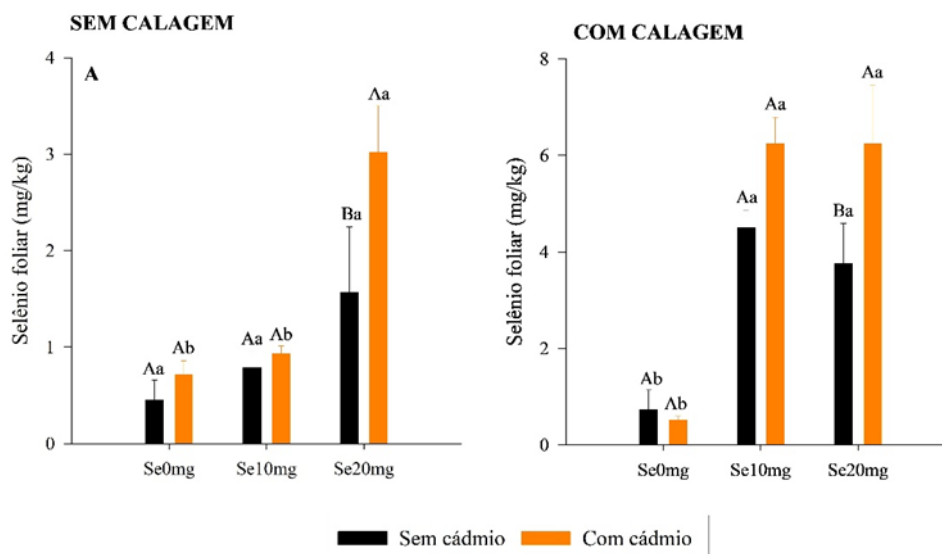
de probabilidade).



6.7 Teor foliar de selênio

Tanto no solo sem calagem quanto no solo com calagem, as plantas -Cd e +Cd diferiram apenas na dose de 20 mg L⁻¹ (Figura 8A e 8B) com as plantas com cádmio sendo superiores. Em relação ao desdobramento das doses nas plantas expostas ao cádmio, a aplicação de 20 mg L⁻¹ foi promoveu maior teor de Se, enquanto as plantas sem Se (0 mg L⁻¹) e a dose de 10 mg L⁻¹ não diferiram (Figura 8A). Já no solo com calagem, as doses de 10 e 20 mg L⁻¹ não apresentaram diferenças estatísticas nas plantas -Cd e +Cd (Figura 8B).

Figura 8. Teor foliar de selênio plantas de cacauero crescidas em solo sem calagem (A) e com calagem (B) submetidas aos tratamentos sem Cd (barra preta) e com adição de Cd (barra laranja) e diferentes doses de Se aplicadas via foliar. Médias seguidas de letras maiúsculas representam diferenças entre os tratamentos de Cd e médias seguidas de letras minúsculas representam diferenças entre as doses de Se (Teste de Tukey a 5% de probabilidade).



7 DISCUSSÃO

As clorofilas a e b são importantes indicadores da capacidade fotossintética das plantas. A redução desses pigmentos sob condições de toxicidade por cádmio está associada à inibição da síntese da δ -aminolevulinato desidratase, devido à interação do Cd com grupos sulfidríla (-SH), além da interferência na fotorredução, causada pela interação com a protoclorofilida redutase (PCR), e da substituição do íon Mg^{2+} no anel de porfirina da molécula de clorofila, comprometendo sua funcionalidade molecular (GILLET et al., 2006).

Neste estudo, observou-se que na ausência de calagem, as plantas expostas ao cádmio (Ccd) e tratadas com doses de Se apresentaram índices de clorofila superiores aos observados nas plantas sem cádmio (Figura 2A). Esse resultado sugere que selênio em concentrações moderadas pode favorecer mecanismos de defesa antioxidantes capazes de reduzir os danos provocados pelo estresse oxidativo induzido pelo cádmio (ULHASSAN et al., 2019). Além disso, a aplicação exógena de Se tem sido associada ao aumento de clorofila e à proteção da maquinaria fotossintética, por meio da redução dos danos oxidativos e da preservação da integridade dos cloroplastos (KHAN et al., 2015; DUN et al., 2020).

No solo corrigido, a combinação entre calagem e selênio pode ter desempenhado um papel importante na proteção do aparato fotossintético. Enquanto a calagem reduz a biodisponibilidade do Cd^{2+} no solo, o selênio aplicado via foliar atua internamente na proteção das membranas dos cloroplastos (JIA et al., 2023). A recuperação de 76,9% no índice de Chl b em plantas expostas ao cádmio e tratadas com 10 mg L⁻¹ reforça essa hipótese, indicando que doses adequadas de Se contribuem para a manutenção da

integridade estrutural dos cloroplastos e reduzem a degradação dos pigmentos fotossintéticos. Resultados semelhantes foram observados por AZIZI et al. (2020) em mudas de *Satureja hortensis* e por JIA et al. (2023) em *Brassica oleracea* L. var. *capitata*.

Em relação às trocas gasosas, a taxa de assimilação de CO₂ (A) mostrou-se um indicador sensível, sendo reduzida em 38% pelo Cd em solo com calagem. O cádmio prejudica a fotossíntese ao substituir íons de cálcio no cofator Mn²⁺/C²⁺ do complexo de evolução do oxigênio (PAGLIANO et al., 2006) e de Fe na ferredoxina, prejudicando o transporte de elétrons durante a fotossíntese (PARMAR et al. 2013). Neste estudo, o Se foi capaz de recuperar a taxa de assimilação líquida (A) apenas no solo sem calagem, especificamente na dose 10 mg L⁻¹ (Figura 3A), sugerindo que essa dose pode estimular mecanismos adaptativos importantes no cacaueiro. Em contrapartida, a redução observada na dose de 20 mg L⁻¹ nas plantas Ccd (Figura 3A) indica que existe um limite para os efeitos benéficos do selênio onde concentrações mais elevadas podem começar a interferir negativamente na fixação de carbono (LIU et al., 2022).

O efeito positivo do selênio sobre a condutância estomática e a transpiração, independentemente da presença de Cd (Figura 3B, 3C, 3E, 3F), sugere melhora no status hídrico das plantas e na regulação do turgor celular. Essas respostas favorecem o fluxo de CO₂ necessário para a fotossíntese, ajudando a minimizar o fechamento estomático induzido pelo cádmio (LIU et al., 2022). Resultados semelhantes foram observados por ZHANG et al. (2020), YANG et al. (2022) e SARDAR et al. (2022) em *Brassica napus* e *B. juncea*, *Perilla frutescens*, *Coriandrum sativum*, respectivamente.

A elevação expressiva da catalase em resposta ao cádmio no solo sem calagem e sua manutenção em níveis baixos após a aplicação de Se sugerem que o Se reduziu o nível de estresse oxidativo nos tecidos. Segundo SANCHES & SILVA (2023) a aplicação de doses adequadas de Se pode favorecer outras rotas de desintoxicação, como a via da glutathione peroxidase, reduzindo a necessidade de ativação da CAT e APX, permitindo que a planta mantenha a sua integridade celular com menor gasto metabólico (SINGH & SINGH, 2018).

A interferência do cádmio na dinâmica nutricional do cacaueiro é decorrente da baixa seletividade dos sistemas de absorção (HARRISON, 2001; CLEMENS, 2006). Como não existem transportadores específicos para o Cd, este elemento utiliza proteínas responsáveis pelo transporte de elementos essenciais, como aquelas pertencentes às famílias ZIP e NRAMPs para penetrar nas células vegetais (ZHENG et al., 2018). No

cacaueiro, o gene TcNRAMP5 destaca-se como um dos principais atuante nesse processo (ULLAH et al., 2018). Dessa forma, em solos ácidos, onde a disponibilidade de cádmio é maior, ocorre intensa competição pelos sítios de absorção, favorecendo o surgimento de desequilíbrios nutricionais.

Um resultado interessante deste estudo foi a influência do selênio sobre a dinâmica do magnésio no solo sem calagem, onde o Se reduziu os teores foliares de Mg, independentemente da presença de cádmio (Figura 6D), indicando um possível antagonismo iônico entre o Se e o Mg no genótipo CCN51. Por outro lado, no solo com calagem, a aplicação de 10 mg L⁻¹ de Se promoveu maiores teores foliares de Ca e Mg em plantas expostas ao Cd quando comparadas as sem cádmio (Figura 6H; 6I). Esse resultado sugere que em condições de calagem, o selênio pode atuar como modulador fisiológico, reduzindo os desequilíbrios nutricionais induzidos pelo cádmio (HASANUZZAMAN et al., 2022). Além disso, a manutenção dos índices de clorofila, mesmo diante das variações nos teores foliares de Mg, sugere que o Se pode ter contribuído para uma utilização mais eficiente desse nutriente no aparato fotossintético.

O aumento dos teores de enxofre observados nas plantas expostas ao cádmio e tratadas com 20 mg L⁻¹ de Se no solo sem calagem é interessante, visto que Se e S compartilham vias metabólicas e transportadores do tipo SULTs; esse incremento pode refletir uma resposta adaptativa da planta ao estresse por cádmio. O enxofre participa diretamente da síntese de compostos, como as fitoquelatinas que são responsáveis pela desintoxicação de metais (AZIZI et al., 2016).

Quanto aos micronutrientes, observou-se que no solo sem calagem a presença de cádmio elevou os teores foliares de ferro e boro na ausência de Se (0 mg L⁻¹) (Figura 7A; 7D). A aplicação de 10 mg L⁻¹ de Se, reduziu os teores desses micronutrientes, o que representa um importante mecanismo de proteção. O excesso de Fe livre favorece a formação de espécies reativas de oxigênio por meio da reação de Fenton (HUYBRECHTS et al., 2019). Assim, a regulação no teor desse elemento pode minimizar os danos oxidativos.

Diferente do relatado por LIMA et al. (2019), que observaram aumento dos teores de manganês após a aplicação de Se, os resultados deste estudo demonstraram uma resposta distinta para esse micronutriente. No solo com calagem, as aplicações de Se reduziram os teores foliares de Zn e Mn (Figura 7G; 7H). Segundo ALEJANDRO et al. (2020), o aumento do pH do solo promovido pela calagem reduz a solubilidade e a disponibilidade do Mn no ambiente radicular ao favorecer sua oxidação. Nesse contexto,

a menor disponibilidade do elemento associada à presença do selênio pode ter influenciado os processos de absorção e transporte desse micronutriente.

Por outro lado, no solo sem calagem, o selênio promoveu o aumento no teor foliar de Mn nas plantas expostas ao cádmio, assim como observado por YANG et al. (2026). Sob pH ácido, o Mn encontra-se altamente solúvel na forma de Mn^{2+} competindo diretamente com o Cd^{2+} pelos sítios de absorção. A aplicação de Se nessa condição pode ter atuado na restauração da homeostase celular e proteção das membranas radiculares contra o dano induzido pelo cádmio, reestabelecendo o fluxo de Mn. Como o Mn desempenha um papel crucial como cofator no complexo de evolução de oxigênio no fotossistema II (WHITE & GREENWOOD, 2013), esse incremento nutricional pode explicar como selênio auxiliou na manutenção do aparato fotossintético, nas plantas crescidas em solo ácido.

A calagem desempenha um papel fundamental como barreira química na contaminação por Cd, uma vez que o aumento do pH do solo diminui sua disponibilidade para absorção pelas plantas (CORRÊA et al., 2008). Contudo os resultados deste estudo demonstraram que a aplicação foliar de Se pode atuar como um complemento, sendo capaz de reduzir a disponibilidade de Cd no solo, tanto na ausência quanto na presença de calagem. Como essa quantificação ocorreu ao final do experimento, podemos sugerir que o resultado reflete um efeito residual das aplicações sucessivas de Se na química da rizosfera, possivelmente via exsudação radicular.

8 CONCLUSÃO

Nossos resultados demonstram que a aplicação foliar de selênio minimizar os efeitos da toxicidade do cádmio em plantas de cacauero do genótipo CCN51, atuando na proteção dos pigmentos fotossintéticos e na modulação de enzimas antioxidantes. Embora as respostas tenham variado conforme a dose de Se, observou-se que o Se promoveu a manutenção dos índices de clorofilas e a regulação da condutância estomática. Além disso, o selênio atuou como um modulador na dinâmica nutricional, mitigando acúmulo de Fe e favorecendo o fluxo de manganês. No sistema solo-planta, o Se foliar exerceu um efeito positivo, ao reduzir a disponibilidade de Cd no solo em ambas condições de solo.

Dessa forma, a aplicação de selênio contribuiu para manutenção do desempenho fisiológico de plantas de cacauero expostas ao cádmio, permitindo a aceitação da hipótese de que a aplicação foliar de selênio reduz os efeitos de toxicidade do cádmio

em mudas de *T. cacao*. Contudo, com a ausência de diferença estatísticas no teor de cádmio foliar, rejeitamos a hipótese de que aplicação foliar de selênio reduz o acúmulo de cádmio em mudas de *T. cacao*.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A.A.F.; VALLE, R.R. Ecophysiology of the cacao tree. *Braz. J. Plant Physiol.* 19 (4) Dec 2007. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400011>
- ALYEMENI, M. N.; AHANGER, M. A.; WIJAYA, L.; ALAM, P.; BHARDWAJ, R.; & AHMAD, P. Selenium mitigates cadmium-induced oxidative stress in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants by modulating chlorophyll fluorescence, osmolyte accumulation, and antioxidant system. **Protoplasma**, 255(2), 459–469, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00709-017-1162-4>
- ASSA, A.; NOOR, A.; R YUNUS, M.; MISNAWI, N.; DJIDE, M. Heavy metal concentrations in cocoa beans (*Theobroma cacao* L.) originating from East Luwu, South Sulawesi, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 979, 12011, 2018.
- ARNER, E.S.; HOLMGREN, A. Physiological functions of thioredoxin and thioredoxin reductase. **Eur J Biochem** 267: 6102–6109, 2000.
- AZIZ, M.; NADIPALLI, R. K.; XIE, X.; SUN, Y.; SUROWIEC, K.; ZHANG, J. L.; PARÉ, P. W. Augmenting sulfur metabolism and herbivore defense in Arabidopsis by bacterial volatile signaling. **Frontiers in plant science**, v. 7, p. 458, 2016
- AZIZI, I.; ESMAIELPOUR, B.; FATEMI, H. Effect of foliar application of selenium on morphological and physiological indices of savory (*Satureja hortensis*) under cadmium stress. **Food Science & Nutrition**, 8(12), 6539-6549, 2020. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1943>
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Cacau do Brasil. Brasília: **MAPA**, Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação, 2022. 56 p. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/ceplac>. Acesso em: 3 fevereiro 2025.
- BISWAS, A.; PAL, S.; PAUL, S. Silicon as a powerful element for mitigation of cadmium stress in rice: A review for global food safety. **Plant Stress**, 10, 100237, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100237>
- BIEMELT, S.; KEETMAN, U.; ALBRECHT, G. Re-aeration following hypoxia or anoxia leads to activation of the antioxidative defense system in roots of wheat seedlings. **Plant Physiology**, v. 116, n. 2, p. 651-658, 1998.
- BLOMMAERT, H.; DE MEESE, C.; WIGGENHAUSER, M.; SARRET, G.; & SMOLDERS, E. Evidence of cadmium transport via the phloem in cacao seedlings. **Plant and Soil**, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06753-0>
- BUEGE, J. A.; AUST, S. D. Microsomal lipid peroxidation. In: **Methods in enzymology**. Academic press, 1978. p. 302-310.
- CARRILLO, K.; MARTÍNEZ, M.; RAMÍREZ, L.; ARGÜELLO, D.; CHAVEZ, E. Distribuição de cádmio (Cd) e relação solo-planta em fazendas de cacau na Costa Rica. **Environ. Monit. Assess.** 2023 , 195 , 1209.

CHEPOTE, RE; SODRÉ, GA; REIS, E.L.; PACHECO, RG; MARROCOS, PCL; VALLE, RR. Recomendações de Corretivos e Fertilizantes na Cultura do Cacaueiro no Sul da Bahia ; **Técnico, B., Ed.; CEPLAC/CEPEC: Ilhéus, Brasil**, 2013; Volume 203, pág. 43

CEPLAC, 2001. Sistema de produção de cacau para a Amazônia brasileira. **CEPLAC, Belém**, 125p.

CLEMENS, S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. **Biochimie** 88, 1707-1719, 2006.

<https://doi.org/10.1016/j.biochi.2006.07.003>

CORRÊA, J. C.; BÜLL, L. T.; PAGANINI, W. S.; GUERRINI, I. A. Disponibilidade de metais pesados em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 3, p. 411–419, 2008.

<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000300017>

CURIE, C.; CASSIN, G.; COUCH, D.; DIVOL, F.; HIGUCHI, K.; LE JEAN, M.; MISSON, J.; SCHIKORA, A.; CZERNIC, P.; & MARI, S. Metal movement within the plant:

Contribution of nicotianamine and yellow stripe 1-like transporters. **Annals of Botany**, 103(1), 1–11, 2009. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn207>

CHUNHABUNDIT, R. Cadmium Exposure and Potential Health Risk from Foods in Contaminated Area, Thailand. **Toxicological Research**, 32(1), 65–72, 2016.

<https://doi.org/10.5487/TR.2016.32.1.065>

DE ARAÚJO, R.P.; DE ALMEIDA, A.-A.F.; PEREIRA, L.S.; MANGABEIRA, P. A. O.; SOUZA, J.O.; PIROVANI, C. P.; AHNERT, D.; & BALIGAR, V. C. Photosynthetic, antioxidative, molecular and ultrastructural responses of young cacao plants to Cd toxicity in the soil. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 144, 148–157, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.006>

DE SOUZA, P. A.; MOREIRA, L. F.; SARMENTO, D. H. A.; & DA COSTA, F. B. Cacao-*Theobroma cacao*. Em *Exotic Fruits*, **Elsevier**, p. 69–76, 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803138-4.00010-1>.

DISCHE, Z. Methods in carbohydrate chemistry. by **RL Whistler and ML Wolfrom**, **Academic Press Inc., New York**, v. 1, p. 507, 1962.

DOS SANTOS, M. L. S.; DE ALMEIDA, A.-A. F.; DA SILVA, N. M.; OLIVEIRA, B. R. M.; SILVA, J. V. S.; JUNIOR, J. O. S.; AHNERT, D.; & BALIGAR, V. C. Mitigation of cadmium toxicity by zinc in juvenile cacao: Physiological, biochemical, molecular and micromorphological responses. **Environmental and Experimental Botany**, 179, 104201, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104201>

European Food Safety Authority (2012). Cadmium dietary exposure in the European population **EFSA Journal**. 10, 2551. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2551>

FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. FAOSTAT: Produção mundial de cacau. Roma: **FAO**, 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat> . Acesso em: 5 fevereiro 2025.

FENG, J.; SHI, Q.; WANG, X.; WEI, M.; YANG, F.; & XU, H. Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. **Scientia Horticulturae**, 123(4), 521–530, 2010.

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.10.013>

- GAO, M.; ZHOU, J.; LIU, H.; ZHANG, W.; HU, Y.; LIANG, J.; & ZHOU, J. Foliar spraying with silicon and selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice. **Science of The Total Environment**, 631–632, 1100–1108, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.047>
- GILLET, S., DECOTTIGNIES, P., CHARDONNET, S., LE MARÉCHAL, P. Cadmium response and redoxin targets in *Chlamydomonas reinhardtii*: a proteomic approach. **Photosynthesis Research** 2006; 89:201–211. <https://doi.org/10.1007/s11120-006-9108-2>
- GUO, L.; CHEN, A.; HE, N.; YANG, D.; & LIU, M. Exogenous silicon alleviates cadmium toxicity in rice seedlings in relation to Cd distribution and ultrastructure changes. **Journal of Soils and Sediments**, 18(4), 1691–1700, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1902-2>
- HARA, S.; SHOJI, Y.; SAKURAI, A.; YUASA, K.; HIMENO, S.; IMURA, N. Effects of selenium deficiency on expression of selenoproteins in bovine arterial endothelial cells. **Biol Pharm Bull** 24: 754–759, 2001.
- HARRISON, N. Inorganic contaminants in food. In: D.H. WATSON, ed. **Food chemical safety contaminants**. Cambridge: Woodhead Publishing, pp. 148-168, 2001.
- HASANUZZAMAN, M.; NAHAR, K.; GARCÍA-CAPARRÓS, P.; PARVIN, K.; ZULFIQAR, F.; AHMED, N.; FUJITA, M. Selenium supplementation and crop plant tolerance to metal/metalloid toxicity. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 12, p. 792770, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.792770>
- HAVIR, E. A.; MCHALE, N. A. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. **Plant Physiology**, v. 84, n. 2, p. 450-455, 1987.
- HUANG, F.; CHEN, L.; ZHOU, Y.; HUANG, J.; WU, F.; HU, Q.; CHANG, N.; QIU, T.; ZENG, Y.; HE, H.; WHITE, J. C.; YANG, W.; & FANG, L. Exogenous selenium promotes cadmium reduction and selenium enrichment in rice: Evidence, mechanisms, and perspectives. **Journal of Hazardous Materials**, 476, 135043, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135043>
- HUANG, Q. Q.; WANG, Q.; WAN, Y. N.; YU, Y.; JIANG, R. F.; & LI, H. F. Application of X-ray absorption near edge spectroscopy to the study of the effect of sulphur on selenium uptake and assimilation in wheat seedlings. **Biologia plantarum**, 61(4), 726–732, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10535-016-0698-z>
- HUYBRECHTS, M.; CUYPERS, A.; DECKERS, J.; IVEN, V.; VANDIONANT, S.; JOZEFCZAK, M.; & HENDRIX, S. Cadmium and Plant Development: An Agony from Seed to Seed. **International Journal of Molecular Sciences**, 20(16), 3971, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijms20163971>
- ISMAEL, M. A.; ELYAMINE, A. M.; MOUSSA, M. G.; CAI, M.; ZHAO, X.; & HU, C. Cadmium in plants: Uptake, toxicity, and its interactions with selenium fertilizers. **Metallomics**, 11(2), 255–277, 2019. <https://doi.org/10.1039/C8MT00247A>
- JIA, KAIYUE.; ZHAN, ZHIPENG.; WANG, BINGQIAN.; WANG, WUHONG.; WEI, WENJING.; LI, DAWEI.; HUANG, WEI.; XU, ZHONGMIN. Exogenous Selenium Enhances Cadmium Stress Tolerance by Improving Physiological Characteristics of Cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*) Seedlings. **Horticulturae** 2023, 9(9), 1016; <https://doi.org/10.3390/horticulturae9091016>.

- JIANG, C.; ZU, C.; LU, D.; ZHENG, Q.; SHEN, J.; WANG, H.; & LI, D. Effect of exogenous selenium supply on photosynthesis, Na⁺ accumulation and antioxidative capacity of maize (*Zea mays* L.) under salinity stress. **Scientific Reports**, 7(1), 42039, 2017. <https://doi.org/10.1038/srep42039>
- JIANG, S.; DU, B.; WU, Q.; ZHANG, H.; DENG, Y.; TANG, X.; & ZHU, J. Selenium Decreases the Cadmium Content in Brown Rice: Foliar Se Application to Plants Grown in Cd-contaminated Soil. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 22(1), 1033–1043, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00711-w>
- KALRA, Y. Handbook of Reference Methods for Plant Analysis; Kalra, Y., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 1997.
- KHAN, Z.; THOUNAOJAM, T. C.; CHOWDHURY, D.; & UPADHYAYA, H. The role of selenium and nano selenium on physiological responses in plant: A review. **Plant Growth Regulation**, v. 100, p. 409–433, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10725-023-00988-0>
- KWIATKOWSKA-MALINA, J. Functions of organic matter in polluted soils: The effect of organic amendments on phytoavailability of heavy metals. **Applied Soil Ecology**, 123, 542–545, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.021>
- KOBAYASHI, J. Pollution by cadmium and the itai-itai disease in Japan. In: Oehme, F.W. (Ed.), Toxicity of Heavy Metals in the Environment. **Marcel Dekker, Inc., New York**, pp. 199–260, 1978.
- LI, L.; WU, H.; VAN GESTEL, C.A.; PEIJNENBURG, W.J. and ALLEN, H.E. Soil acidification increases metal extractability and bioavailability in old orchard soils of Northeast Jiaodong Peninsula in China. *Environmental Pollution*, vol. 188, pp. 144–152, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.003>
- LIMA, L. W.; CHECCHIO, M. V.; DOS REIS, A. R.; DE CÁSSIA ALVES, R.; TEZZOTO, T., & GRATÃO, P. L. Selenium restricts cadmium uptake and improve micronutrients and proline concentration in tomato fruits. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, 18, 101057, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101057>
- LIU, H.; XIAO, C.; QIU, T.; DENG, J.; CONG, X.; CHENG, S.; RAO, S.; ZHANG, Y. Selenium Regulates Antioxidant, Photosynthesis, and Cell Permeability in Plants under Various Abiotic Stresses: A Review. **Plants (Basel)**. 2022 Dec 22; 12(1):44. <https://doi.org/10.3390/plants12010044>
- LIU, J.; MA, J.; HE, C.; LI, X.; ZHANG, W.; XU, F.; LIN, Y.; & WANG, L. Inhibition of cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells by a wall-bound form of silicon. **New Phytologist**, 200(3), 691–699, 2013. <https://doi.org/10.1111/nph.12494>
- LOWELL, C. A.; TOMLINSON, P. T.; KOCH, K. E. Sucrose-metabolizing enzymes in transport tissues and adjacent sink structures in developing citrus fruit. **Plant Physiology**, v. 90, n. 4, p. 1394–1402, 1989.
- LUX, A.; MARTINKA, M.; VACULIK, M.; & WHITE, P. J. Root responses to cadmium in the rhizosphere: A review. **Journal of Experimental Botany**, 62(1), 21–37, 2011. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq281>
- MADDELA, N. R.; KAKARLA, D.; GARCÍA, L. C.; CHAKRABORTY, S.; VENKATESWARLU, K.; & MEGHARAJ, M. Cocoa-laden cadmium threatens human

health and cacao economy: A critical view. **Science of The Total Environment**, 720, 137645, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137645>

MARTIN, M. Á.; & RAMOS, S. Impact of cocoa flavanols on human health. **Food and Chemical Toxicology**, 151, 112121, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112121>

MA, J. F.; & YAMAJI, N. Functions and transport of silicon in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**, 65(19), 3049–3057, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00018-008-7580-x>

MCLAUGHLIN, M. J.; SMOLDERS, E.; ZHAO, F. J.; GRANT, C & MONTALVO, D. (2021). Managing cadmium in agricultural systems. **Advances in Agronomy**, 166, 1-129. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.10.004>

MEHDI, Y.; HORNICKE, J.-L.; ISTASSE, L.; & DUFRASNE, I. Selenium in the Environment, Metabolism and Involvement in Body Functions. **Molecules**, 18(3), 3292–3311, 2013. <https://doi.org/10.3390/molecules18033292>

MILLER, G. L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical chemistry**, v. 31, n. 3, p. 426-428, 1959.

MOHAMED, I.; AHAMADOU, B.; LI, M.; GONG, C.; CAI, P.; LIANG, W.; HUANG, Q. Fractionation of copper and cadmium and their binding with soil organic matter in a contaminated soil amended with organic materials. **Journal of Soils and Sediments**, vol. 10, pp. 973-982, 2010.

NADARAJAH K.K. ROS Homeostasis in Abiotic Stress Tolerance in Plants. **International Journal of Molecular Sciences**. 2020;21:5208. <https://doi.org/10.3390/ijms21155208>

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant and cell physiology**, v. 22, n. 5, p. 867-880, 1981

NORDBERG, G. F.; BERNARD, A.; DIAMOND, G. L.; DUFFUS, J. H.; ILLING, P.; NORDBERG, M.; BERGDAHL, I. A.; JIN, T.; & SKERFVING, S. Risk assessment of effects of cadmium on human health (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, 90(4), 755–808, 2018. <https://doi.org/10.1515/pac-2016-0910>

NORDBERG, G.F. Historical perspectives on cadmium toxicology. **Toxicol. Appl. Pharmacol.** 238, 192–200, 2009.

POOJA., VIKRAM.; SHARMA, J.; VERMA, S.; & SHARMA, A. Importance of silicon in combating a variety of stresses in plants: A review. **Journal of Applied and Natural Science**, 14(2), 607–630, 2022. <https://doi.org/10.31018/jans.v14i2.3426>

QIAN, L.; DAWAR, K.; ULLAH, I.; IRFAN, M.; ZHANG, Z.; MIAN, I. A.; KHAN, B.; GUL, N.; FAHAD, S.; JALAL, A.; DANISH, S.; IQBAL, R. K.; & ALARFAJ, A. A. Zinc Foliar Application Mitigates Cadmium-Induced Growth Inhibition and Enhances Wheat Growth, Chlorophyll Contents, and Yield. **ACS Omega**, 8(36), 32372–32381, 2023. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01511>

RAYMAN, M.P. The importance of selenium to human health. **Lancet**, 356, 233–241, 2000.

SARDAR, R.; AHMED, S.; SHAH, A.A.; YASIN, N.A. Selenium nanoparticles reduced cadmium uptake, regulated nutritional homeostasis and antioxidative system in Coriandrum sativum grown in cadmium toxic conditions. **Chemosphere** 2022, 287, 132332. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132332>

- SCHAEFER H.R.; DENNIS S.; FITZPATRICK S: Cadmium: mitigation strategies to reduce dietary exposure. **J Food Sci** 2020, 85: 260–267. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14997>
- SASAKI, A.; YAMAJI, N.; YOKOSHO, K.; & MA, J. F. Nramp5 is a major transporter responsible for manganese and cadmium uptake in rice. **Plant Cell** 24, 2155–2167, 2012.
- SHAARI, N. E. M.; TAJUDIN, M. T. F. M.; KHANDAKER, M. M.; MAJRASHI, A.; ALENAZI, M. M.; ABDULLAHI, U. A.; & MOHD, K. S. Cadmium toxicity symptoms and uptake mechanism in plants: A review. **Brazilian Journal of Biology**, 84, e252143, 2024. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.252143>
- STADLOBER, M.; SAGER, M.; IRGOLIC, K.J. Effects of selenate supplemented fertilisation on the selenium level of cereals-Identification and quantification of selenium compounds by HPLC-ICP-MS. **Food Chem.** 2001, 73, 357–366.
- SINGH, R., UPADHYAY, A. K., SINGH, D. P. Regulation of oxidative stress and mineral nutrient status by selenium in arsenic treated crop plant *Oryza sativa*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 148, p. 105-113, 2018.
- SORS, T. G.; ELLIS, D. R.; SALT, D. E. Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants. *Photosynthesis Research*. **Photosynthesis Research**, 86(3), 373–389, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11120-005-5222-9>
- SUHANI, I.; SAHAB, S.; SRIVASTAVA, V.; SINGH, R. P. Impact of cadmium pollution on food safety and human health. **Current Opinion in Toxicology**, 27, 1-7, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2021.04.004>
- SURAI, P. F.; KOCHISH, I. I.; FISININ, V. I.; VELICHKO, O. A. (2018). Selenium in Poultry Nutrition: From Sodium Selenite to Organic Selenium Sources. **The Journal of Poultry Science**, 55(2), 79–93. <https://doi.org/10.2141/jpsa.0170132>
- TANG, L.; MAO, B.; LI, Y.; LV, Q.; ZHANG, L.; CHEN, C.; HE, H.; WANG, W.; ZENG, X.; SHAO, Y.; PAN, Y.; HU, Y.; PENG, Y.; FU, X.; LI, H.; XIA, S.; ZHAO, B. Knockout of OsNramp5 using the CRISPR/Cas9 system produces low Cd-accumulating indica rice without compromising yield. **Scientific Reports**, 7(1), 14438, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14832-9>
- TAVAKOLI, S.; ENTESHARI, S A.; YOUSEFIFARD, M. Investigation of the effect of selenium on growth, antioxidant capacity and secondary metabolites in *Melissa officinalis*. **Iranian Journal of Plant Physiology**, 10 (2), 3125- 3134, 2020.
- TOSTO, A.; MORALES, A.; RAHN, E.; EVERS, J. B.; ZUIDEMA, P. A.; ANTEN, N. P. R. Simulating cocoa production: A review of modelling approaches and gaps. **Agricultural Systems**, 206, 103614, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103614>
- THOMINE, S.; WANG, R.; WARD, J.M.; CRAWFORD, N.M.;SCHROEDER, J.I. Cadmium and iron transport by members of a plant metal transporter family in *Arabidopsis* with homology to *Nramp* genes. **Proc Natl Acad Sci**, 97, 4991-4996, 2000.
- TURAKAINEN, M.; HARTIKAINEN, H.; SEPPÄNEN, M. M. Effects of Selenium Treatments on Potato (*Solanum tuberosum* L.) Growth and Concentrations of Soluble Sugars and Starch. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 52(17), 5378–5382, 2004. <https://doi.org/10.1021/jf040077x>
- ULLAH, I.; WANG, Y.; EIDE, D.J.; DUNWELL, J.M. Evolution, and functional analysis of Natural Resistance-Associated Macrophage Proteins (NRAMPs) from *Theobroma cacao* and

their role in cadmium accumulation. *Sci Rep* **8**, 14412, 2012. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32819-y>7YG

ULHASSAN Z., GILL R. A., HUANG H., ALI S., MWAMBA T. M., ALI B., ET AL. Selenium mitigates the chromium toxicity in *Brassicca napus* L. by ameliorating nutrients uptake, amino acids metabolism and antioxidant defense system. **Plant Physiology and Biochemistry** 145, 142–152, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.10.035>

URAGUCHI, S.; KAMIYA, T.; SAKAMOTO, T.; KASAI, K.; SATO, Y.; NAGAMURA, Y.; YOSHIDA, A.; KYOZUKA, J.; ISHIKAWA, S.; FUJIWARA, T. Low-affinity cation transporter (*OsLCT1*) regulates cadmium transport into rice grains. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 108(52), 20959–20964, 2011. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116531109>

USEPA. 2007. **Method 3051A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils, Revision 1**. Washington, DC

VANDERSCHUEREN, R.; ARGÜELLO, D.; BLOMMAERT, H.; MONTALVO, D.; BARRAZA, F.; MAURICE, L.; SCHRECK, E.; SCHULIN, R.; LEWIS, C.; VAZQUEZ, J. L.; UMAHARAN, P.; CHAVEZ, E.; SARRET, G.; SMOLDERS, E. Mitigating the level of cadmium in cacao products: Reviewing the transfer of cadmium from soil to chocolate bar. **Science of The Total Environment**, 781, 146779, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146779>

VELIKOVA, V.; YORDANOV, I.; EDREVA, A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous polyamines. **Plant Science**, East Park Shannon, v. 151, n. 1, p. 59-66, 2000

WANG, B.; ZHANG, D.; WANG, W.; SONG, Y.; LU, M.; DING, S. Foliar Application of Selenium Reduces Cadmium Accumulation in Walnut Seedlings. **Forests**, 13(9), 1493, 2022. <https://doi.org/10.3390/f13091493>

WADE, J.; AC-PANGAN, M.; FAVORETTO, V. R.; TAYLOR, A. J.; ENGESETH, N.; MARGENOT, A. J. Drivers of cadmium accumulation in *Theobroma cacao* L. beans: A quantitative synthesis of soil-plant relationships across the Cacao Belt. **PLOS ONE**, 17(2), e0261989, 2022. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261989>

WHITE, P. J. Selenium metabolism in plants. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) General Subjects**, 1862(11), 2333–2342, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2018.05.006>

WHO – World Health Organization. JECFA database: Cadmium (Chemical ID 1376). Geneva: **WHO**. Disponível em: <https://apps.who.int/food-additives-contaminants-jecfa-database/Home/Chemical/1376>. Acesso em: 4 janeiro 2025.

WU, C.; DUN, Y.; ZHANG, Z.; LI, M.; WU, G. Foliar application of selenium and zinc to alleviate wheat (*Triticum aestivum* L.) cadmium toxicity and uptake from cadmium-contaminated soil. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 190, 110091, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110091>

YANG, XIAOHUAN.; LI, YING.; MA, JINHU.; WU, FEI.; WANG, LIYIN.; SUN, LIANGLIANG.; ZHANG, PING.; WANG, WENYING.; XU, JIN. Comparative physiological and soil microbial community structural analysis revealed that selenium alleviates cadmium stress in *Perilla frutescens*. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1022935, 07 out. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1022935>

YANG, Z.; SUI, F.; NIE, Z., YAO, C., LIU, H., LIUVH. Selenium alleviates cadmium toxicity by restricting its transfer and regulating starch anabolism genes expression. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.311, 119797, 2026.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2026.119797>

ZANANDREA, I. et al. Tolerance of *Sesbania virgata* plants to flooding. **Australian Journal of Botany**, v. 57, n. 8, p. 661-669, CXC 2010.

ZHANG, Z.; W.; DONG, Y.Y.; FENG, L.Y.; DENG, Z.L.; XU, Q.; TAO, Q.; WANG, C.Q.; CHEN, Y.-E.; YUAN, M.; YUAN, S. Selenium Enhances Cadmium Accumulation Capability in Two Mustard Family Species—*Brassica napus* and *B. juncea*. **Plants** 2020, 9, 904. <https://doi.org/10.3390/plants9070904>

ZHENG, X.; CHEN, L.; LI, X. Arabidopsis and rice showed a distinct pattern in ZIPs genes expression profile in response to Cd stress, **Bot. Stud.**, 2018, 59, 22.
<https://doi.org/10.1186/s40529-018-0238-6>

ZHOU, J.; ZHANG, C.; DU, B.; CUI, H.; FAN, X.; ZHOU, D.; ZHOU, J. Soil and foliar applications of silicon and selenium effects on cadmium accumulation and plant growth by modulation of antioxidant system and Cd translocation: Comparison of soft vs. durum wheat varieties. **Journal of Hazardous Materials**, 402, 123546, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.1235>