

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta tese
será disponibilizado somente a partir
de 31/05/2024.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP CÂMPUS DE
JABOTICABAL**

**PAPEL BENÉFICO DO SELÊNIO EM CANA-DE-AÇÚCAR:
EFEITOS FISIOLÓGICOS, BIOQUÍMICOS E
PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA**

Marcio Souza da Silva
Engenheiro Agrônomo

2023

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP CÂMPUS DE
JABOTICABAL**

**PAPEL BENÉFICO DO SELÊNIO EM CANA-DE-AÇÚCAR:
EFEITOS FISIOLÓGICOS, BIOQUÍMICOS E
PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA**

Discente: Marcio Souza da Silva

Orientador: Prof. Dr. André Rodrigues dos Reis

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias – Unesp, Campus de
Jaboticabal, como parte das exigências para a
obtenção do título de Doutor em Agronomia
(Produção Vegetal).

2023

S586p Silva, Marcio Souza da
Papel benéfico do selênio em cana-de-açúcar: efeitos fisiológicos,
bioquímicos e produtividade agrícola / Marcio Souza da Silva. --
Jaboticabal, 2023
174 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: André Rodrigues dos Reis

1. Estresses abióticos. 2. Setor sucroenergético. 3. Sacarose. 4.
Metabolismo antioxidante. 5. Nutrição de plantas. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: PAPEL BENÉFICO DO SELÊNIO EM CANA-DE-AÇÚCAR: EFEITOS FISIOLÓGICOS, BIOQUÍMICOS E PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA

AUTOR: MARCIO SOUZA DA SILVA

ORIENTADOR: ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:



Documento assinado digitalmente
ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS
Data: 31/05/2023 10:25:37-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>



Documento assinado digitalmente
RENAN CALDAS UMBURANAS
Data: 04/05/2023 10:04:18-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Biossistemas / FEI UNESP Tupa



Documento assinado digitalmente
ELCIO FERREIRA DOS SANTOS
Data: 03/06/2023 08:22:58-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. ELCIO FERREIRA DOS SANTOS (Participação Virtual)
Departamento de Agronomia / Instituto Federal de Mato Grosso do Sul - IFMS Nova Andradina/MS

Prof. Dr. RENAN CALDAS UMBURANAS (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / Escola Superior de Agricultura ESALQ/USP



Documento assinado digitalmente
JOSE LAVRES JUNIOR
Data: 02/06/2023 15:34:12-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. JOSÉ LAVRES JUNIOR (Participação Virtual)
Laboratório de Isótopos Estáveis / Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP

Prof. Dr. PEDRO LUÍS DA COSTA AGUIAR ALVES (Participação Virtual)
Departamento de Biologia / FCAV UNESP Jaboticabal



Documento assinado digitalmente
PEDRO LUIS DA COSTA AGUIAR ALVES
Data: 31/05/2023 10:57:02-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Jaboticabal, 31 de maio de 2023

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

MARCIO SOUZA DA SILVA, nascido no município de Sud Mennucci - SP em 24 de março de 1994 é engenheiro agrônomo formado pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP/FEIS (2017). Durante a graduação foi bolsista de iniciação científica por 36 meses pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) onde realizou pesquisas acerca da morfofisiologia da soja resistente ao glifosato em resposta à exposição ao herbicida e seus impactos no metabolismo primário. No período de graduação também atuou como monitor de duas disciplinas de Fisiologia vegetal I e Fisiologia Vegetal II para os cursos de Engenharia Agrônômica e Ciências Biológicas na UNESP/FEIS. Realizou estágio obrigatório junto à empresa Geoclen para prospecção de agentes de biocontrole para o manejo da doença da murcha e seca dos ponteiros em eucalipto. Logo em seguida, ingressou no curso de mestrado em Fitotecnia pela Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ/USP onde foi bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior por 8 meses e depois por 14 meses pela FAPESP. Durante o mestrado, realizou estudos sobre a partição de carbono e nitrogênio em café arábica em resposta à carga pendente de frutos, com foco em bioquímica e metabolômica, concluindo o mestrado no ano de 2019. Concomitantemente, realizou MBA em agronegócios pela ESALQ/USP onde estudou sobre análise econômica e viabilidade do cultivo de mandioca pela agricultura familiar (2019). Em 2019, ingressou no programa de pós-graduação em agronomia (Produção vegetal) pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. No doutorado, realiza pesquisas para caracterizar os efeitos benéficos do selênio em cana-de-açúcar, com foco em metabolismo primário e antioxidante. Possui expertise em fisiologia da produção de grandes culturas. Atualmente, é engenheiro agrônomo responsável pelo planejamento e desenvolvimento agrícola da usina Vale do Paraná - Álcool e Açúcar S/A.

EPÍGRAFE

"Em seu coração o homem planeja o seu caminho, mas o Senhor determina os seus passos". Provérbios 16:9

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Domingos P. Souza, por me ensinar a cada dia o significado das palavras humildade, respeito, caráter e perseverança.

À minha mãe Anita S. C. Souza, pelo seu amor incondicional, pela sua dedicação com a nossa educação e incentivo intensamente dispensados.

Vocês sempre acreditaram no meu potencial, estiveram sempre presentes me apoiando, incentivando nos momentos difíceis, de desespero, mas também nos momentos de alegrias, de vitórias e de conquistas. Somente nós sabemos o quão dura foi a batalha, mas hoje lhes ofereço mais essa conquista.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida e por ter me ofertado resiliência nos momentos difíceis, como diz na Bíblia Sagrada: “Nossa esperança está no Senhor; ele é o nosso auxílio e a nossa proteção” (Salmos 33:20).

Aos meus pais, Domingos P. Souza e Anita S. C. Souza; meus irmãos, Marcelo P. Souza, Maurício S. Silva e Marcos Tiago S. Silva, e toda minha família por terem contribuído com a minha educação e formação, além do grande apoio, carinho, esforço e incentivo sempre demonstrados.

À minha amada esposa Ana Gabriela A. Campos pelo amor, companheirismo, carinho, paciência e apoio presenteados.

Ao meu “irmão” Gustavo R. F. Oliveira (Matias) pela amizade, união fraterna e auxílio mútuo.

Aos meus primos queridos Andreia C. Cavalcanti e Arnaldo Silva pelo apoio, suporte e incentivo presenteados.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP/FCAV pela oportunidade concedida para a realização do curso.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao Prof. Dr. André Rodrigues dos Reis por me orientar, desafiar e incentivar durante essa etapa da minha formação acadêmica. Agradeço pela confiança no meu trabalho e pelos inúmeros ensinamentos transmitidos.

Ao Grupo de Estudos em Fisiologia Agrícola da UNESP – Campus de Tupã pelo apoio concedido. Agradeço especialmente à Amanda Pereira Paixão, Luan Dionnes Kaiber Moreira, Mateus Vendramini Rampazzo, Matheus Luis Oliveira Cunha, Lara Caroline Alves de Oliveira, Maria Gabriela Dantas Bereta Lanza, Vinicius Martins Silva e Pedro Henrique Gorni pela cooperação durante a realização das análises bioquímicas.

À Usina Vale do Paraná – Alcool e Açúcar S/A pelo suporte para a realização dos experimentos e análises tecnológicas.

À todas as pessoas que de alguma forma colaboraram com a execução deste trabalho e que de forma injusta não foram citadas aqui.

PAPEL BENÉFICO DO SELÊNIO EM CANA-DE-AÇÚCAR: EFEITOS FISIOLÓGICOS, BIOQUÍMICOS E PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA

RESUMO - O selênio (Se) é um elemento benéfico para as plantas, porém as respostas fisiológicas da cana-de-açúcar com uso do Se ainda são escassas. Além disso, não está documentado qual é a fonte e dose recomendada de Se, bem como os níveis críticos de fitotoxicidade. Este estudo tem como objetivo caracterizar o efeito benéfico e fitotóxico do Se em resposta à aplicação foliar de Se utilizando cinco concentrações de Se (0, 20, 40, 80, 160 g ha⁻¹) e duas fontes de Se (selenato e selenito de sódio). Adicionalmente, objetiva-se validar a melhor época de aplicação (pré-seca e pré-maturação) da dose benéfica de selenato e selenito de sódio em cana-de-açúcar de sequeiro e irrigado em condições de campo. De modo geral, tanto os sintomas benéficos quanto os sintomas fitotóxicos foram observados em doses menores utilizando o tratamento com selenito comparado ao tratamento com selenato, devido aos efeitos combinados de rapidez na assimilação de selenito em formas orgânicas e também em razão da maior porcentagem do íon acompanhante (sódio) na fonte selenito. A dose benéfica de selenato é de 40 g ha⁻¹ e do selenito de 20 g ha⁻¹. O efeito benéfico do Se está relacionado ao aumento da massa de raiz, número, massa de perfilhos, taxa fotossintética, concentração de CO₂, eficiência da carboxilação e do uso da água. Além disso, o Se-benéfico melhorou a qualidade tecnológica com aumento da concentração de sacarose, pol e °Brix do caldo obtido. A dose fitotóxica de selenato é de 80 g ha⁻¹ e do selenito de 40 g ha⁻¹. A fitotoxicidade do Se foi caracterizada com redução do crescimento da raiz e parte aérea da cana-de-açúcar aliado a perdas na qualidade tecnológica do caldo obtido. Além disso, a Se-fitotoxicidade promoveu acúmulo de osmólitos via homeostase do metabolismo de carboidratos e degradação de proteínas visando minimizar o estresse oxidativo (H₂O₂ e MDA). Além disso, a fitotoxidez desencadeou na cana-de-açúcar o acúmulo de Ca, Mg, Zn, Fe, Mn e S como estratégia nutricional para acionar mecanismos enzimáticos e não enzimáticos para mitigar o estresse ocasionado pelo excesso de Se. Em condições de campo, foi possível observar que a aplicação foliar de selenito de sódio na época vegetativa mitiga o estresse hídrico em cana-de-açúcar através do estímulo da biossíntese de pigmentos fotossintetizantes e pigmentos de fotoproteção que resultou no maior acúmulo de sacarose na folha e no colmo. Na época de maturação, o melhor tratamento para mitigar o estresse hídrico foi o selenato que atuou como agente antioxidante reduzindo EROs e peroxidação lipídica. Em cana irrigada, a aplicação na época vegetativa de ambas as fontes de Se são eficazes para aumentar o potencial produtivo da cultura através do aumento do número e diâmetro de perfilhos, massa fresca da parte aérea, produtividade de perfilhos e rendimento de açúcar. Na época de maturação, apenas o selenato teve resposta positiva na cana irrigada, aumentando a concentração de clorofilas e feofitina na folha. Conclui-se que a produtividade de açúcar por hectare da cana de sequeiro foi melhorada com uso de selenato e selenito aplicado na época de maturação. Para cana irrigada, ambas as épocas de aplicação utilizando o selenato ou selenito foram eficazes para aumentar a produtividade de açúcar.

Palavras-chave: estresses abióticos, Setor sucroenergético, Sacarose, Metabolismo antioxidante, Nutrição de plantas

BENEFICIAL ROLE OF SELENIUM IN SUGARCANE: PHYSIOLOGICAL, BIOCHEMICAL EFFECTS AND AGRICULTURAL PRODUCTIVITY

ABSTRACT - Selenium (Se) is a beneficial element for plants, but the physiological responses of sugarcane with the use of Se are still scarce. Furthermore, it is not documented what is the source and recommended dose of Se, as well as the critical levels of phytotoxicity. This study aims to characterize the beneficial and phytotoxic effect of Se in response to Se foliar application using five Se concentrations (0, 20, 40, 80, 160 g ha⁻¹) and two Se sources (Selenate and selenite of sodium). Additionally, the objective is to validate the best season of application (vegetative stage and pre-maturation) of the beneficial dose of sodium selenate and selenite in sugarcane under rainfed and irrigated field conditions. In general, both beneficial and phytotoxic symptoms were observed at lower doses using selenite treatment compared to selenate treatment, due to the combined effects of faster assimilation of selenite into organic forms and also due to the higher percentage of the ion sodium in the selenite source. The beneficial dose of selenate is 40 g ha⁻¹ and of selenite 20 g ha⁻¹. The beneficial effect of Se is related to the increase in root mass, number, tiller mass, photosynthetic rate, CO₂ concentration, carboxylation efficiency and water use. In addition, Se-beneficial improved the technological quality with an increase in the concentration of sucrose, pol and °Brix of the obtained broth. The phytotoxic dose of selenate is 80 g ha⁻¹ and of selenite 40 g ha⁻¹. The phytotoxicity of Se was characterized by reduced root and shoot growth of sugarcane combined with losses in the technological quality of the juice obtained. In addition, Se-phytotoxicity promoted osmolyte accumulation via homeostasis of carbohydrate metabolism and protein degradation in order to minimize oxidative stress (H₂O₂ and MDA). In addition, phytotoxicity triggered the accumulation of Ca, Mg, Zn, Fe, Mn and S in sugarcane as a nutritional strategy to trigger enzymatic and non-enzymatic mechanisms to mitigate the stress caused by excess Se. Under field conditions, it was possible to observe that the foliar application of sodium selenite in the growing season mitigates water stress in sugarcane by stimulating the biosynthesis of photosynthetic pigments and photoprotection pigments, which resulted in greater accumulation of sucrose in the leaf. and in the culm. At the time of maturation, the best treatment to mitigate water stress was selenate, which acted as an antioxidant agent reducing ROS and lipid peroxidation. In irrigated sugarcane, the application in the growing season of both sources of Se are effective in increasing the productive potential of the crop by increasing the number and diameter of tillers, fresh mass of the aerial part, productivity of tillers and sugar yield. At the time of maturation, only selenate had a positive response in irrigated sugarcane, increasing the concentration of chlorophylls and pheophytin in the leaf. It is concluded that the sugar productivity per hectare of dry cane was improved with the use of selenate and selenite applied at the time of maturation. For irrigated cane, both application times using selenate or selenite were effective in increasing sugar productivity.

Keywords: abiotic stresses, Sugar-energy sector, Sucrose, Antioxidant metabolism, Plant nutrition

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1 INTRODUÇÃO

A agricultura contemporânea enfrenta grandes desafios para a produtividade agrícola que é fortemente afetada por vários estresses bióticos e abióticos, que reduzem severamente o rendimento e a qualidade das culturas para uma população global crescente (Ortiz-Bobea et al., 2021). Além disso, a cobrança social e ambiental por práticas agrícolas que melhorem a qualidade nutricional dos alimentos e minimizem os impactos ambientais são os principais alvos da agricultura sustentável (Dhaliwal et al., 2022).

As mudanças climáticas tem aumentado a incidência e a gravidade de diversos estresses abióticos como a seca, calor, luminosidade e geadas que reduzem consideravelmente a colheita das principais espécies de plantas cultivadas, como por exemplo, o arroz, trigo, milho, soja, café e cana-de-açúcar (Rivero et al., 2022). Em muitas partes do mundo, a precipitação tornou-se menos previsível com fenômenos mais intensos e com maior periodicidade de seca. Adicionalmente, o aumento da temperatura tem sido frequente nas lavouras ocasionando problemas de veranicos devido a maior evapotranspiração com períodos longos de déficit hídrico (Cui et al., 2022).

Em algumas partes do globo onde se encontra regiões áridas e semiáridas a presença de solos salinos é um grande causador de queda na produtividade das culturas na ordem de 17% (Cheng et al., 2021). Além disso, atividades antrópicas podem contaminar solos e rios com metais pesados, os quais inviabiliza a atividade agropecuária e também causa diversos desequilíbrios ambientais (Santorufu et al., 2021).

Outro grande desafio da agricultura é a produção de alimentos de qualidade visando fornecer pelos alimentos as quantidades dietéticas necessárias para a saúde humana como uma estratégia de segurança alimentar e saúde pública (Dhaliwal et al., 2022). Todavia, ao longo dos anos os programas de melhoramento das plantas cultivadas destinaram grandes esforços para aumento da produtividade agrícola,

esquecendo-se da qualidade dos alimentos que são fornecidos para alimentação humana e animal (Stangoulis e Knez, 2022).

Nesse contexto, o uso de Se tem recebido grande atenção na agricultura para aumentar a produtividade agrícola (Mateus et al., 2021; Shalaby et al., 2021), mitigar os efeitos das mudanças climáticas globais (Aqib et al., 2021; Liu et al., 2021; Saleem et al., 2021) e combater a fome oculta de Se por meio da biofortificação de alimentos comestíveis (Lončarić et al., 2021; Luo et al., 2021; Sabatino et al., 2021; Silva et al., 2021).

Quando usado em baixas concentrações em plantas cultivadas, o Se é considerado um elemento benéfico com efeitos pronunciados na mitigação de estresses como salinidade (Desoky et al., 2021), seca (Z. Ahmad et al., 2021), flutuações de temperatura (Sousa et al., 2022), metais pesados (Alves et al., 2020), herbicidas (Afzal et al., 2022) e outros poluentes ambientais. O efeito antiestresse do selênio está relacionado principalmente à ação das selenoproteínas para estimular a via da glutathione peroxidase, que também aumenta os compostos enzimáticos (superóxido dismutase, catalase e ascorbato peroxidase) e não enzimáticos (ácido ascórbico, flavonoides e tocoferóis) que permitem à planta desintoxicar espécies reativas de oxigênio (EROs) (Lanza e Reis, 2021).

O Se tem sido amplamente utilizado para mitigar o estresse hídrico em arroz (Patnaik et al., 2023), trigo (Sardari et al., 2022; Yadav et al., 2023), tomate (Saleem e Fariduddin, 2022) e batata (Perfileva et al., 2022) com efeitos pronunciados na redução de EROs, e aumento da produtividade e qualidade agrícola.

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é um dos principais recursos renováveis para a produção de biocombustíveis, respondendo por 40% do bioetanol, além de contribuir com 80% da produção mundial de açúcar e eletricidade limpa (Rabelo et al., 2019). O setor sucroenergético enfrenta grandes desafios devido às mudanças climáticas globais, que aumentam a incidência e a gravidade de vários estresses abióticos, principalmente a seca que reduz significativamente o rendimento das safras. Em muitas partes do mundo, a precipitação está se tornando menos previsível e com estações secas mais frequentes (Cui et al., 2022). Porém, existem poucos trabalhos na literatura sobre os efeitos benéficos do Se em cana-de-açúcar.

Diante disso, surge a hipótese que o Se tem efeito benéfico em cana-de-açúcar em função do seu papel benéfico no metabolismo antioxidante, fotorregulação e fotossíntese, podendo melhorar a performance agrícola e mitigar o estresse ocasionado pela seca através de mecanismos fisiológicos enzimáticos e não enzimáticos de modo a incrementar a produtividade e qualidade agrícola. Este trabalho teve como objetivo geral avaliar as doses de selenato e selenito de sódio via aplicação foliar para caracterizar os efeitos benéficos e fitotóxicos do Se no metabolismo, crescimento, produtividade e qualidade tecnológica. Além disso, objetivou-se avaliar os efeitos da dose benéfica de Se na mitigação do estresse hídrico em cana-de-açúcar em condições de campo.

Os objetivos específicos, são: (i) caracterizar as respostas benéficas e fitotóxicas associadas à fonte e à dose aplicada de selênio sobre os sintomas visuais, ajustes metabólicos e interações com nutrientes (ii) caracterizar as respostas benéficas e fitotóxicas associadas à fonte e à dose aplicada de selênio sobre a fotossíntese, produtividade e qualidade tecnológica; (iii) e avaliar a melhor época de aplicação de selenato e selenito de sódio visando mitigar o estresse hídrico em cana-de-açúcar.

5 – CONCLUSÃO

A dose benéfica de selenato é de 40 g ha⁻¹ e do selenito de 20 g ha⁻¹. O efeito benéfico do Se em cana-de-açúcar está relacionado ao aumento da massa de raiz, número e massa de perfilhos. Além disso, o Se-benéfico melhorou a qualidade tecnológica com aumento da concentração de sacarose, pol e °Brix do caldo obtido. A dose benéfica proporcionou um aumento na concentração total de pigmentos fotossintéticos. Além disso, a dose benéfica de Se também aumentou a taxa fotossintética, concentração de CO₂ interno, eficiência da carboxilação e eficiência do uso da água. A combinação do estímulo da produção de pigmentos fotossintéticos, maior eficiência do uso da água e crescimento do sistema radicular também foi observado aumento da qualidade tecnológica nos colmos da cana-de-açúcar tratada com Se benéfico.

A dose fitotóxica de selenato e do selenito de 160 g ha⁻¹. A fitotoxicidade do Se foi caracterizada com redução do crescimento da raiz e parte aérea da cana-de-açúcar aliado a perdas na qualidade tecnológica do caldo obtido. Além disso, a Se-fitotoxicidade promoveu acúmulo de osmólitos (aminoácidos e sacarose) via homeostase do metabolismo de carboidratos e degradação de proteínas visando minimizar o estresse oxidativo (H₂O₂ e MDA). Além disso, a fitotoxidez desencadeou na cana-de-açúcar o concentração de Ca, Mg, Zn, Fe, Mn e S como estratégia nutricional para acionar mecanismos enzimáticos e não enzimáticos para mitigar o estresse ocasionado pelo excesso de Se. A dose de 160 g ha⁻¹ como selenato e selenito de sódio provocou sintomas de fitotoxicidade com redução de pigmentos fotossintéticos, crescimento da raiz e parte aérea, e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar.

A aplicação foliar da dose benéfica de selenito de sódio na época vegetativa mitiga o estresse hídrico em cana-de-açúcar através do estímulo da biossíntese de pigmentos fotossintetizantes (clorofilas) e pigmentos de fotoproteção (carotenoides) que resultou no maior acúmulo de sacarose na folha e no colmo (°brix, pol, ATR). Na época de maturação, o melhor tratamento para mitigar o estresse hídrico foi o selenato que atuou como agente antioxidante reduzindo EROs e peroxidação lipídica.

Em cana irrigada, a aplicação na época vegetativa de ambas as fontes de Se-benéfico são eficazes para aumentar o potencial produtivo da cultura através do aumento do número e diâmetro de perfilhos, massa fresca da parte aérea, produtividade de perfilhos e rendimento de açúcar. Na época de maturação, apenas o selenato teve resposta positiva na cana irrigada, aumentando a concentração de clorofilas (A, B e total) e feofitina (A e B) na folha.

Dessa forma, fica claro que o Se na dose benéfica aumenta a tolerância da cana de sequeiro ao estresse hídrico e melhora o potencial produtivo da cana irrigada.

6 – REFERÊNCIAS

Afzal B, Naaz H, Sami N, Yasin D, Khan NJ, Fatma T (2022) Mitigative effect of biosynthesized SeNPs on cyanobacteria under paraquat toxicity. **Chemosphere** 293:133562. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133562>

Alexieva V, Sergiev I, Mapelli S, Karanov E (2001) The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant, Cell Environmental** 24:1337–1344. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x>

Aqib M, Nawaz F, Majeed S, Ghaffar A, Ahmad KS, Shehzad MA, Tahir MN, Aurangzaib M, Javeed HMR, Habib-ur-Rahman M, Usmani MM (2021) Physiological insights into sulfate and selenium interaction to improve drought tolerance in mung bean. **Physiology Molecular Biology Plants** 27:1073–1087. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-00992-6>

Ashwin Narayan J, Chakravarthi M, Nerkar G, Manoj VM, Dharshini S, Subramonian N, Premachandran MN, Arun Kumar R, Krishna Surendar K, Hemaprabha G, Ram B, Appunu C (2021) Overexpression of expansin EaEXPA1, a cell wall loosening protein enhances drought tolerance in sugarcane. **Industrial Crops Production** 159:113035. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113035>

Azevedo, Ricardo Antunes; Alas, R. M.; Smith, R. J.; Lea PL (1998) Response of antioxidant enzymes to transfer from elevated carbon dioxide to air and ozone fumigation, in the leaves and roots of wild-type and a catalase-deficient mutant of barley. **Physiology Plant** 104:280–292

Bhadwal S, Sharma S (2022) Selenium Alleviates Carbohydrate Metabolism and Nutrient Composition in Arsenic Stressed Rice Plants. **Rice Science** 29:385–396. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2021.11.008>

Bradford, MM. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytic Biochemistry** 72:248–259. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3).

Carcia-Caparrós P, Hasanuzzaman M, Lao M (2019) Oxidative stress and antioxidant defense in plants under drought conditions. **Plant Abiotic Stress Tolerance Agronomy Molecular Biotechnology Approaches** 1:207–219. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0_9

Carey AM, Scheckel KG, Lombi E, Newville M, Choi Y, Norton GJ, Price AH, Meharg AA (2012) Grain accumulation of selenium species in rice (*Oryza sativa* L.). **Environmental Science Technology** 46:5557–5564.

<https://doi.org/10.1021/es203871j>

Chen Y, Gao Y, Wu S, Zhang L, Wang Q, Yao X, Gao H (2022) Wet deposition of atmospheric selenium and sensitivity to emission and precipitation patterns. **Science Total Environmental** 835:155402.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155402>

Consecana. **Manual de Instruções**. (2006). Piracicaba: Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo, 5. Ed., 111 p.

Cui Y, Ouyang S, Zhao Y, Tie L, Shao C, Duan H (2022) Plant responses to high temperature and drought: A bibliometrics analysis. **Frontiers Plant Science** 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1052660>

Cunha MLO, Oliveira LCA de, Silva VM, Montanha GS, Reis AR dos (2022) Selenium increases photosynthetic capacity, daidzein biosynthesis, nodulation and yield of peanuts plants (*Arachis hypogaea* L.). **Plant Physiology Biochemistry** 190:231–239. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.08.006>

da Fonseca M de C, Bossolani JW, de Oliveira SL, Moretti LG, Portugal JR, Scudeletti D, de Oliveira EF, Crusciol CAC (2022) *Bacillus subtilis* Inoculation Improves Nutrient Uptake and Physiological Activity in Sugarcane under Drought Stress. **Microorganisms** 10. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040809>

Dubois M, Gilles K, Hamilton JK, Rebers PA, Smith F (1951) A colorimetric method for the determination of sugars. **Nature** 168:167. <https://doi.org/10.1038/168167a0>

El-Badri AM, Batool M, Mohamed IAA, Wang Z, Wang C, Tabl KM, Khatab A, Kuai J, Wang J, Wang B, Zhou G (2022) Mitigation of the salinity stress in rapeseed (*Brassica napus* L.) productivity by exogenous applications of bio-selenium nanoparticles during the early seedling stage. **Environmental Pollution** 310. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119815>

Elsheery NI, Sunoj VSJ, Wen Y, Zhu JJ, Muralidharan G, Cao KF (2020) Foliar application of nanoparticles mitigates the chilling effect on photosynthesis and

photoprotection in sugarcane. **Plant Physiology Biochemistry** 149:50–60.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.035>

García-Caparrós P, De Filippis L, Gul A, Hasanuzzaman M, Ozturk M, Altay V, Lao MT (2021) Oxidative Stress and Antioxidant Metabolism under Adverse Environmental Conditions: a Review. **Botanical Review** 87:421–466.
<https://doi.org/10.1007/s12229-020-09231-1>

Garcia A, Crusciol CAC, McCray JM, Nascimento CAC, Martello JM, de Siqueira GF, Tarumoto MB (2020) Magnesium as a Promoter of Technological Quality in Sugarcane. **Journal Soil Science Plant Nutrition** 20:19–30.
<https://doi.org/10.1007/s42729-019-00096-x>

Garcia Tavares R, Lakshmanan P, Peiter E, O'Connell A, Caldana C, Vicentini R, Soares JS, Menossi M (2018) ScGAI is a key regulator of culm development in sugarcane. **Journal Experimental Botany** 69:3823–3837.
<https://doi.org/10.1093/jxb/ery180>

Giannopolitis, C. N.; Ries SK (1977) Superoxide dismutases. I Occorence in higher plants. **Plant Physiology** 59:309–314.
<https://doi.org/10.1080/09553008314551231>

Gilani H, Sahebi H, Oliveira F (2020) Sustainable sugarcane-to-bioethanol supply chain network design: A robust possibilistic programming model. **Applied Energy** 278:115653. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115653>

Gomes-Junior RA, Moldes CA, Delite FS, Pompeu GB, Grato PL, Mazzafera P, Lea PJ, Azevedo RA (2006) Antioxidant metabolism of coffee cell suspension cultures in response to cadmium. **Chemosphere** 65:1330–1337.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.04.056>

Guan DX, Dai ZH, Sun HJ, Ma LQ (2022) Arsenic and selenium in the plant-soil-human ecosystem: CREST publications during 2018–2021. **Critical Review Environmental Science Technology** 52:3567–3572.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2021.2010836>

Gui JY, Rao S, Gou Y, Xu F, Cheng S (2022a) Comparative study of the effects of selenium yeast and sodium selenite on selenium content and nutrient quality in broccoli florets (*Brassica oleracea* L. var. *italica*). **Journal Science Food Agriculture** 102:1707–1718. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11511>

Gui JY, Rao S, Huang X, Liu X, Cheng S, Xu F (2022b) Interaction between selenium and essential micronutrient elements in plants: A systematic review. **Science Total Environmental** 853:158-173. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158673>

Han D, Tu S, Dai Z, Huang W, Jia W, Xu Z, Shao H (2022) Comparison of selenite and selenate in alleviation of drought stress in *Nicotiana tabacum* L. **Chemosphere** 287:132136. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132136>

Hasanuzzaman M, Bhuyan MHMB, Raza A, Hawrylak-Nowak B, Matraszek-Gawron R, Mahmud J Al, Nahar K, Fujita M (2020) Selenium in plants: Boon or bane? **Environmental Experimental Botany** 178. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104170>

Heath, L. R.; Packer L (1968) Photoperoxidation in isolated Chloroplasts of Fatty Acid Peroxidation In 1965 we observed that isolated chloroplasts upon illumination produce substances which react with thiobarbituric acid to form a pink color. An investigation has therefore been under- Isolated should. **Biochemistry Biophysical** 125:189–198

Hemaprabha G, Swapna S, Lavanya DL, Sajitha B, Venkataramana S (2013) Evaluation of Drought Tolerance Potential of Elite Genotypes and Progenies of Sugarcane (*Saccharum* sp. hybrids). **Sugar Tech** 15:9–16. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0182-9>

Irato P, Santovito G (2021) Enzymatic and non-enzymatic molecules with antioxidant function. **Antioxidants** 10. <https://doi.org/10.3390/antiox10040579>

Jiang H, Lin W, Jiao H, Liu J, Chan L, Liu X, Wang R, Chen T (2021) Uptake, transport, and metabolism of selenium and its protective effects against toxic metals in plants: a review. **Metallomics** 13:1–11. <https://doi.org/10.1093/mtomcs/mfab040>

Karimi R, Ghabooli M, Rahimi J, Amerian M (2020) Effects of foliar selenium application on some physiological and phytochemical parameters of *Vitis vinifera* L. cv. Sultana under salt stress. **Journal Plant Nutrition** 43:2226–2242. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1766072>

Khalil R, Yusuf M, Bassuony F, Haroun S, Gamal A (2022) Alpha-tocopherol reinforce selenium efficiency to ameliorates salt stress in maize plants through carbon metabolism, enhanced photosynthetic pigments and ion uptake. **South African Journal Botany** 144:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.08.033>

Lanza MGDB, Reis AR dos (2021) Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses. **Plant Physiology Biochemistry** 164:27–43. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.026>

Lara TS, Lessa JH de L, de Souza KRD, Corguinha APB, Martins FAD, Lopes G, Guilherme LRG (2019) Selenium biofortification of wheat grain via foliar application and its effect on plant metabolism. **Journal of Food Composition and Analysis** 81:10–18. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.05.002>

Li J, Liu R, Zhang C, Yang J, Lyu L, Shi Z, Man YB, Wu F (2022) Selenium uptake and accumulation in winter wheat as affected by level of phosphate application and arbuscular mycorrhizal fungi. **Journal Hazard Materials** 433:128762. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128762>

Li Y, Zhu N, Liang X, Zheng L, Zhang C, Li YF, Zhang Z, Gao Y, Zhao J (2020) A comparative study on the accumulation, translocation and transformation of selenite, selenate, and SeNPs in a hydroponic-plant system. **Ecotoxicology Environmental Safety** 189:109955. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109955>

Lichtenthaler Hk, Wellburn Ar (1983) Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. **Biochemical Society Transactions** 11:591–592. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>

Liu K, Li S, Han J, Zeng X, Ling M, Mao J, Li Y, Jiang J (2021) Effect of selenium on tea (*Camellia sinensis*) under low temperature: Changes in physiological and biochemical responses and quality. **Environmental Experimental Botany** 188:104475. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104475>

Luís Oliveira Cunha M, de Mello Prado R (2023) Synergy of Selenium and Silicon to Mitigate Abiotic Stresses: a Review. **Gesunde Pflanz.** <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00826-9>

Luo H, Xing P, Liu J, Pan S, Tang X, Duan M (2021) Selenium improved antioxidant response and photosynthesis in fragrant rice (*Oryza sativa* L.) seedlings during drought stress. **Physiology Molecular Biology Plants** 27:2849–2858. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-01117-9>

Mahadevaiah C, Hapase P, Sreenivasa V, Hapase R, Swamy HKM, Anilkumar C, Mohanraj K, Hemaprabha G, Ram B (2021) Delineation of genotype × environment interaction for identification of stable genotypes for tillering phase drought stress

tolerance in sugarcane. **Scientif Report** 11:1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98002-y>

Majeed A, Rashid I, Niaz A, Ditta A, Sameen A, Al-Huqail AA, Siddiqui MH (2022) Balanced Use of Zn, Cu, Fe, and B Improves the Yield and Sucrose Contents of Sugarcane Juice Cultivated in Sandy Clay Loam Soil. **Agronomy** 12. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030696>

Mangrio N, Kandhro MN, Soomro AA, Mari N, Shah Z ul H (2020) Growth, yield and sucrose percent response of sugarcane to zinc and boron application. **Sarhad Journal of Agriculture** 36:459–469. <https://doi.org/10.17582/JOURNAL.SJA/2020/36.2.459.469>

Marques AC, Pessoa CC, Coelho ARF, Luís IC, Daccak D, Campos PS, Simões M, Almeida AS, Pessoa MF, Reboredo FH, Guerra M, Leitão RG, Ramalho JC, Marques P, Silva MM, Legoinha P, Pais IP, Lidon F (2021) Rice (*Oryza sativa* L.) Biofortification with Selenium: Enrichment Index and Interactions among Nutrients. **Biology and Life Sciences** 39:1-14. <https://doi.org/10.3390/iecps2020-08701>

Mateus MP de B, Tavanti RFR, Tavanti TR, Santos EF, Jalal A, Reis AR dos (2021) Selenium biofortification enhances ROS scavenge system increasing yield of coffee plants. **Ecotoxicology Environmental Safety** 209:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111772>

Moldes CA, Medici LO, Abrahão OS, Tsai SM, Azevedo RA (2008) Biochemical responses of glyphosate resistant and susceptible soybean plants exposed to glyphosate. **Acta Physiology Plant** 30:469–479. <https://doi.org/10.1007/s11738-008-0144-8>

Morales-Espinoza MC, Cadenas-Pliego G, Pérez-Alvarez M, Hernández-Fuentes AD, De La Fuente MC, Benavides-Mendoza A, Valdés-Reyna J, Juárez-Maldonado A (2019) Se nanoparticles induce changes in the growth, antioxidant responses, and fruit quality of tomato developed under nacl stress. **Molecules** 24. <https://doi.org/10.3390/molecules24173030>

Moulick D, Ghosh D, Mandal J, Bhowmick S, Mondal D, Choudhury S, Santra SC, Vithanage M, Biswas JK (2023) A cumulative assessment of plant growth stages and selenium supplementation on arsenic and micronutrients accumulation in rice

grains. **Journal Clean Production** 386:135764.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135764>

Oliveira CLB de, Cassimiro JB, Lira MV da S, Boni A da S, Donato N de L, Reis R dos A, Heinrichs R (2022) Sugarcane Ratoon Yield and Soil Phosphorus Availability in Response to Enhanced Efficiency Phosphate Fertilizer. **Agronomy** 12:2817. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112817>

Ortiz-Bobea A, Ault TR, Carrillo CM, Chambers RG, Lobell DB (2021) Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. **Nature Climate Change** 11:306–312. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1>

Patnaik GP, Monisha V, Thavaprakash N, Djanaguiraman M, Sachin S, Mrunalini K, Srinivasan G, Naik MA, Varshini S V, Sapthagiri S (2023) Selenium Application Improves Drought Tolerance during Reproductive Phase of Rice. **Sustainability** 30:1–13

Perfileva AI, Graskova IA, Sukhov BG, Krutovsky K V. (2022) Effect of Selenium Nanocomposites Based on Natural Polymer Matrices on the Biomass and Storage of Potato Tubers in a Field Experiment. **Agronomy** 12. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061281>

Poblaciones MJ, Rodrigo S, Santamaría O, Chen Y, McGrath SP (2014) Agronomic selenium biofortification in Triticum durum under Mediterranean conditions: From grain to cooked pasta. **Food Chemical** 146:378–384. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.070>

Pokhrel GR, Wang KT, Zhuang HM, Wu YC, Chen W, Lan Y, Zhu X, Li Z, Fu FF, Yang G Di (2020) Effect of selenium in soil on the toxicity and uptake of arsenic in rice plant. **Chemosphere** 239:124712. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124712>

Rabelo SC, Paiva LBB de, Pin TC, Pinto LFR, Tovar LP, Nakasu PYS (2019) Chemical and energy potential of sugarcane. Elsevier Inc.

Rady MM, Belal HEE, Gadallah FM, Semida WM (2020) Selenium application in two methods promotes drought tolerance in Solanum lycopersicum plant by inducing the antioxidant defense system. **Scientia Horticulture** 266:109290. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109290>

Raij, B. van; Andrade, J.C.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. (2001). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas Instituto Agronômico. 285p.

Rasool A, Shah WH, Mushtaq NU, Saleem S, Hakeem KR, ul Rehman R (2022) Amelioration of salinity induced damage in plants by selenium application: A review. **South African Journal Botany** 147:98–105. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.12.029>

Reyes JAO, Carpennero AS, Santos PJA, Delfin EF (2020) Effects of water regime, genotype, and formative stages on the agro-physiological response of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) to drought. **Plants** 9. <https://doi.org/10.3390/plants9050661>

Ribeiro DM, Silva Júnior DD, Cardoso FB, Martins AO, Silva WA, Nascimento VL, Araújo WL (2016) Growth inhibition by selenium is associated with changes in primary metabolism and nutrient levels in *Arabidopsis thaliana*. **Plant Cell Environmental** 39:2235–2246. <https://doi.org/10.1111/pce.12783>

Ribeiro R V., MacHado RS, MacHado EC, MacHado DFSP, Magalhães Filho JR, Landell MGA (2013) Revealing drought-resistance and productive patterns in sugarcane genotypes by evaluating both physiological responses and stalk yield. **Experimental Agriculture** 49:212–224. <https://doi.org/10.1017/S0014479712001263>

Sachdev S, Ansari SA, Ansari MI, Fujita M, Hasanuzzaman M (2021) Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. **Antioxidants** 10:1–37. <https://doi.org/10.3390/antiox10020277>

Saeedi M, Soltani F, Babalar M, Izadpanah F, Wiesner-Reinhold M, Baldermann S (2021) Selenium Fortification Alters the Growth, Antioxidant Characteristics and Secondary Metabolite Profiles of Cauliflower (*Brassica oleracea* var. botrytis) Cultivars in Hydroponic Culture. **Plants** 10:1537. <https://doi.org/10.3390/plants10081537>

Saleem M, Fariduddin Q (2022) Novel mechanistic insights of selenium induced microscopic, histochemical and physio-biochemical changes in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant. An account of beneficiality or toxicity. **Journal Hazard Materials** 434. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128830>

Sardari M, Rezayian M, Niknam V (2022) Comparative Study for the Effect of Selenium and Nano-Selenium on Wheat Plants Grown under Drought Stress. **Russian Journal Plant Physiology** 69. <https://doi.org/10.1134/S102144372206022X>

Scudeletti D, Crusciol CAC, Bossolani JW, Moretti LG, Momesso L, Servaz Tubaña B, de Castro SGQ, De Oliveira EF, Hungria M (2021) Trichoderma asperellum Inoculation as a Tool for Attenuating Drought Stress in Sugarcane. **Frontiers Plant Science** 12:1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.645542>

Selvi A, Devi K, Manimekalai R, Prathima PT (2020) Comparative analysis of drought-responsive transcriptomes of sugarcane genotypes with differential tolerance to drought. **3 Biotechnology** 10:1–14. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02226-0>

Shalaby T, Bayoumi Y, Alshaal T, Elhawat N, Sztrik A, El-Ramady H (2017) Selenium fortification induces growth, antioxidant activity, yield and nutritional quality of lettuce in salt-affected soil using foliar and soil applications. **Plant Soil** 421:245–258. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3458-8>

Shalaby TA, Abd-Alkarim E, El-Aidy F, Hamed ES, Sharaf-Eldin M, Taha N, El-Ramady H, Bayoumi Y, dos Reis AR (2021) Nano-selenium, silicon and H₂O₂ boost growth and productivity of cucumber under combined salinity and heat stress. **Ecotoxicology Environmental Safety** 212. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111962>

Shekari L, Aroiee H, Mirshekari A, Nemati H (2019) Protective role of selenium on cucumber (*Cucumis sativus* L.) exposed to cadmium and lead stress during reproductive stage role of selenium on heavy metals stress. **Journal Plant Nutrition** 42:529–542. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1554075>

Silva VM, Boleta EHM, Lanza MGDB, Lavres J, Martins JT, Santos EF, dos Santos FLM, Putti FF, Junior EF, White PJ, Broadley MR, Carvalho HWP de, Reis AR dos (2018) Physiological, biochemical, and ultrastructural characterization of selenium toxicity in cowpea plants. **Environmental Experimental Botany** 150:172–182. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.03.020>

Silva VM, Boleta EHM, Martins JT, dos Santos FLM, da Rocha Silva AC, Alcock TD, Wilson L, de Sá ME, Young SD, Broadley MR, White PJ, dos Reis AR (2019) Agronomic biofortification of cowpea with selenium: effects of selenate and selenite

applications on selenium and phytate concentrations in seeds. **Journal Science Food Agriculture** 99:5969–5983. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9872>

Silva VM, Nardeli AJ, Mendes NAC, Alcock TD, Rocha M de M, Putti FF, Wilson L, Young SD, Broadley MR, White PJ, Reis AR dos (2021) Application of sodium selenate to cowpea (*Vigna unguiculata* L.) increases shoot and grain Se partitioning with strong genotypic interactions. **Journal Trace Element Medicinal Biology** 67. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2021.126781>

Silva VM, Rimoldi Tavanti RF, Grato PL, Alcock TD, Reis AR dos (2020) Selenate and selenite affect photosynthetic pigments and ROS scavenging through distinct mechanisms in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) plants. **Ecotoxicology Environmental Safety** 201:110777. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110777>

van Handel E (1968) Direct microdetermination of sucrose. **Analytical Biochemistry** 22:280–283. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(68\)90317-5](https://doi.org/10.1016/0003-2697(68)90317-5)

Wu Z, Bañuelos GS, Lin ZQ, Liu Y, Yuan L, Yin X, Li M (2015) Biofortification and phytoremediation of selenium in China. **Frontiers Plant Science** 6:1–8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00136>

Xu S, Wang J, Shang H, Huang Y, Yao W, Chen B, Zhang M (2018) Transcriptomic characterization and potential marker development of contrasting sugarcane cultivars. **Scientific Report** 8:1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19832-x>

Yadav S, Sharma S, Sharma KD, Dhansu P, Devi S, Preet K, Ahlawat P, Kamboj P, Rani P, Rani B, Kaushik P, Kumar A (2023) Selenium Mediated Alterations in Physiology of Wheat under Different Soil Moisture Levels. **Sustainability** 15:1771. <https://doi.org/10.3390/su15031771>

Yemm EW, Cocking EC, Ricketts RE (1955) The determination of amino-acids with ninhydrin. **Analyst** 80:209–214. <https://doi.org/10.1039/AN9558000209>

Zhang H, Zhao Z, Nie B, Lyu C, Liu X (2021) Selenium loss and changes in product quality during cooking of selenium enriched potato tubers. **Journal of Food Composition and Analysis** 96:103728. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103728>

Zhang H, Zhao Z, Zhang X, Zhang W, Huang L, Zhang Z, Yuan L, Liu X (2019) Effects of foliar application of selenate and selenite at different growth stages on

Selenium accumulation and speciation in potato (*Solanum tuberosum* L.). **Food Chemistry** 286:550–556. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.185>

Zhou X, Yang J, Kronzucker HJ, Shi W (2020) Selenium Biofortification and Interaction With Other Elements in Plants: A Review. **Frontiers Plant Science** 11:1–18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.586421>.