

# RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 11/02/2024.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**MAYCON ANDERSON DE ARAUJO**

**RESPOSTAS MORFOFISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS ENVOLVIDAS NO  
METABOLISMO DE NITROGÊNIO E AÇÚCARES EM VARIEDADES DE  
CANA-DE-AÇÚCAR FERTILIZADAS COM SELÊNIO**

Ilha Solteira

2022

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – SISTEMAS DE  
PRODUÇÃO**

**MAYCON ANDERSON DE ARAUJO**

**RESPOSTAS MORFOFISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS ENVOLVIDAS NO  
METABOLISMO DE NITROGÊNIO E AÇÚCARES EM VARIEDADES DE  
CANA-DE-AÇÚCAR FERTILIZADAS COM SELÊNIO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Especialidade: Sistemas de Produção.

Prof. PhD. André Rodrigues dos Reis  
**Orientador**

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

A663r Araujo, Maycon Anderson de.  
Respostas morfofisiológicas e bioquímicas envolvidas no metabolismo de nitrogênio e açúcares em variedades de cana-de-açúcar fertilizadas com selênio / Maycon Anderson de Araujo. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022  
133 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2022

Orientador: André Rodrigues dos Reis  
Inclui bibliografia

1. Biofortificação agrônômica. 2. Selênio. 3. Sistema antioxidativo . 4. Metabolismo de nitrogênio. 5. Metabolismo de carboidratos. 6. Morfoanatomia vegetal.

  
Raiane da Silva Santos

# CERTIFICADO DE APROVAÇÃO



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** Respostas morfofisiológicas e bioquímicas envolvidas no metabolismo de nitrogênio e açúcares em variedades de cana-de-açúcar fertilizadas com selênio

**AUTOR:** MAYCON ANDERSON DE ARAUJO

**ORIENTADOR:** ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA, especialidade: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

*André Rodrigues dos Reis*

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

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

Dr. FERNANDO SHINTATE GALINDO (Participação Virtual)  
Centro de Energia Nuclear na Agricultura / Universidade de São Paulo - USP

Ilha Solteira, 11 de fevereiro de 2022

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha mãe, Vera Lúcia de Araujo, uma mulher guerreira que amo muito, e à minha avó, Nair da Silva Araujo, que veio a falecer enquanto eu finalizava as correções desta dissertação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família, em especial à minha mãe pelo apoio durante toda minha vida acadêmica. Agradeço aos meus irmãos, Jhenyffer, João e Lucas, porque faço isso também por eles.

Agradeço ao Prof. André Rodrigues dos Reis pela confiança e pela orientação durante todo o Mestrado.

Agradeço aos amigos conquistados em Tupã, Lara Caroline, Matheus, Maria, Júlio, Nema e Carol pela parceria durante essa pandemia dentro e fora do laboratório.

Agradeço à Andressa pela parceria durante todo o desenvolvimento do meu trabalho, desde a instalação até as últimas análises. Agradeço por sua amizade, pelo seu companheirismo e pelo seu amor.

Agradeço também a Priscila, Yasmin e Jéssica pelo apoio técnico durante minhas atividades no laboratório em Tupã.

E por fim, ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001” e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento do presente trabalho junto ao processo (2020/06461-3).

*“...a ignorância mais frequentemente  
gera confiança do que o conhecimento...”*

Charles Darwin

## RESUMO GERAL

O selênio (Se) é um elemento benéfico para plantas e essencial para humanos e animais. A necessidade da fertilização com Se em plantas cultivadas é importante frente a mudanças climáticas como aumento da temperatura atmosférica e menor disponibilidade hídrica, o que induz maior estresse abiótico. O efeito benéfico do Se nas plantas está diretamente relacionado com o aumento da eficiência na assimilação do nitrogênio e seu papel como mitigador do estresse abiótico pela redução das espécies reativas de oxigênio em função da promoção do metabolismo antioxidante. O trabalho se divide em quatro capítulos. O primeiro se caracteriza por uma revisão sistemática do papel do Se sobre o metabolismo vegetal. O segundo e terceiro capítulos correspondem, respectivamente, às análises realizadas aos 45 e aos 85 após a aplicação dos tratamentos. O quarto capítulo traz as modificações morfoanatômicas nas folhas e raízes apresentadas pelas variedades de cana-de-açúcar após a fertilização com Se. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da aplicação de Se na cana-de-açúcar, avaliando-se as respostas morfofisiológicas, bioquímicas e relações com crescimento e produtividade. O experimento foi conduzido sob delineamento inteiramente casualizado, com esquema fatorial, utilizando duas variedades de cana-de-açúcar (RB96 6928 e RB86 7515) e 4 concentrações de Se (0; 5; 10 e 20  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) aplicados na forma de selenato de sódio em solução nutritiva, distribuídos em quatro repetições. As avaliações fisiológicas ocorreram aos 45 e 85 dias após a aplicação do Se, e as avaliações anatômicas foram realizadas aos 60 dias após a aplicação dos tratamentos. A concentração de Se nas folhas de cana-de-açúcar aumentou com a aplicação com as doses de selenato de sódio para ambas as variedades, as quais apresentaram diferentes respostas morfofisiológicas. A partir das análises aos 45 dias e aos 85 dias, foi possível observar modificações no metabolismo de nitrogênio, de carboidratos, pigmentos e taxas fotossintéticas, controle da peroxidação lipídica e respostas antioxidativas. Apesar de respostas positivas para ambas variedades nas demais variáveis, somente a variedade RB96 6928 apresentou aumento nas concentrações de sacarose e açúcares totais no caldo. Em relação à morfoanatomia, a aplicação do Se provocou modificações na anatomia foliar e radicular das variedades de cana-de-açúcar, modificações que podem auxiliar no aumento da tolerância frente ao estresse abiótico. A aplicação de Se aumentou o metabolismo de nitrogênio e antioxidante das variedades de cana-de-açúcar. Isso desencadeou o maior crescimento e produtividade de ambas variedades. Este estudo traz importantes informações relevantes e originais sobre a aplicabilidade da fertilização com Se na cana-de-açúcar.

**Palavras-chave:** *Saccharum* spp; selênio; biofortificação; fotossíntese; metabolismo do nitrogênio; metabolismo de carboidrato; sistema antioxidativo; morfoanatomia.

## ABSTRACT

Selenium (Se) is a beneficial element for plants and essential for humans and animals. The need for Se fertilization in cultivated plants is important in the face of climate changes such as increased atmospheric temperature and lower water availability, which induces greater abiotic stress. The beneficial effect of Se in plants is directly related to the promotion of nitrogen assimilation efficiency and its role as a mitigator of abiotic stress by reducing reactive oxygen species due to the promotion of antioxidant metabolism. The work is divided into four chapters. The first is characterized by a systematic review of the role of Se in plant metabolism. The second and third chapters correspond, respectively, to the analysis carried out at 45 and 85 after the application of the treatments. The fourth chapter brings the morphoanatomical changes in leaves and roots presented by sugarcane varieties after fertilization with Se. The objective of this study was to evaluate the effect of Se application on sugarcane, evaluating the morphophysiological and biochemical responses and relationships with growth and productivity. The experiment was carried out in a completely randomized design, with a factorial scheme, using two sugarcane varieties (RB96 6928 and RB86 7515) and 4 concentrations of Se (0; 5; 10 and 20  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) applied in the form of sodium selenate in nutrient solution, distributed in four replications. Physiological evaluations were realized at 45 and 85 days after Se application, and anatomical assessments were performed at 60 days after application of treatments. Se concentration in sugarcane leaves increased with application of sodium selenate doses for both varieties, which showed different morphophysiological responses. From the analysis at 45 days and 85 days, it was possible to observe changes in nitrogen and carbohydrates metabolisms, pigments and photosynthetic rates, control of lipid peroxidation and antioxidative responses. Despite positive responses for both varieties in the other variables, only the RB96 6928 variety showed an increase in sucrose and total sugar concentrations in the juice. Regarding the morphoanatomy, the application of Se caused changes in the leaf and root anatomy of sugarcane varieties, changes that may help to increase tolerance to abiotic stress. Se application increased nitrogen and antioxidant metabolism of sugarcane varieties. This triggered the highest growth and productivity of both varieties. This study brings important relevant and original information about the applicability of Se fertilization in sugarcane.

**Keywords:** *Saccharum* spp; selenium; biofortification; photosynthesis; nitrogen metabolism; carbohydrate metabolism; antioxidant system; morphoanatomy.

## SÚMARIO

|  |    |
|--|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO GERAL</b> .....  | 9  |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | 11 |
| <b>CAPÍTULO I: PAPEL FISIOLÓGICO DO SELÊNIO SOBRE O METABOLISMO VEGETAL E SEUS MECANISMOS NO AUMENTO DA TOLERÂNCIA AO ESTRESSE ABIÓTICO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA</b> ..... | 15 |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | 16 |
| <b>2 PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS E TAXAS FOTOSSINTÉTICAS</b> .....   | 17 |
| <b>3 RESPOSTAS NO SISTEMA ANTIOXIDATIVO INDUZIDAS PELO SELÊNIO</b> .....   | 18 |
| <b>4 SELÊNIO NO METABOLISMO DE CARBOIDRATOS</b> .....  | 20 |
| <b>5 SELÊNIO NO METABOLISMO DE NITROGÊNIO</b> .....  | 23 |
| <b>6 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS</b> .....  | 24 |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | 24 |
| <b>CAPÍTULO II: SELÊNIO AUMENTA O CRESCIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR: RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E ANTIOXIDANTES NA REGULAÇÃO DE DEPÓSITO DE AMIDO EM TECIDOS FOLIARES</b> .....    | 41 |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | 42 |
| <b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....  | 44 |
| <b>2.1 Instalação do experimento</b> .....   | 44 |
| <b>2.2 Análise de Se nas folhas</b> .....  | 44 |
| <b>2.3 Análise de Malondialdeído (MDA) e peróxido de hidrogênio</b> .....  | 45 |
| <b>2.4 Análise do metabolismo antioxidante</b> .....   | 45 |
| <b>2.5 Pigmentos fotossintéticos</b> .....   | 45 |
| <b>2.6 Taxa fotossintética e determinação de trocas gasosas</b> .....  | 45 |
| <b>2.7 Atividade da redutase do nitrato (EC 1.7.99.4)</b> .....  | 46 |
| <b>2.8 Análises de compostos nitrogenados</b> .....  | 46 |
| <b>2.9 Análise do perfil de açúcares em HPLC</b> .....   | 46 |
| <b>2.10 Teste histoquímico para amido</b> .....  | 47 |
| <b>2.11 Análises biométricas</b> .....   | 47 |
| <b>2.12 Análises estatísticas</b> .....  | 47 |
| <b>3 RESULTADOS</b> .....  | 47 |
| <b>3.1 Análise de selênio nas folhas</b> .....   | 47 |
| <b>3.2 Sistema oxidativo</b> .....   | 48 |
| <b>3.3 Sistema antioxidante e conteúdo proteico</b> .....  | 48 |
| <b>3.4 Pigmentos</b> .....   | 49 |
| <b>3.5 Eficiência fotossintética</b> .....   | 49 |
| <b>3.6 Compostos nitrogenados e atividade da redutase do nitrato</b> .....   | 50 |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.7 <i>Análise de açúcares</i> .....  | 50        |
| 3.8 <i>Teste histoquímico de Amido</i> .....  | 51        |
| 3.9 <i>Heatmap com análise de correlação e análise de componentes principais</i> .....  | 51        |
| 3.10 <i>Análises biométricas</i> .....  | 51        |
| <b>4 DISCUSSÃO</b> .....  | <b>52</b> |
| <b>5 CONCLUSÃO</b> .....  | <b>54</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....  | <b>54</b> |
| <b>CAPÍTULO III: FERTILIZAÇÃO COM SELÊNIO AUMENTA PIGMENTOS FOTOSINTÉTICOS, METABOLISMO ANTIOXIDANTE E CRESCIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR</b> ..... <b>74</b>  |           |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>75</b> |
| 2.1 <i>Instalação do experimento</i> .....  | 77        |
| 2.2 <i>Análise Nutricional</i> .....  | 77        |
| 2.3 <i>Análise de Malondialdeído (MDA) e Peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)</i> .....  | 77        |
| 2.4 <i>Análise de Atividade da Superóxido Dismutase (SOD - EC 1.15.1.1), Catalase (CAT - EC 1.11.1.6), Ascorbato Peroxidase (APX - EC 1.11.1.11) e Análise de proteínas solúveis totais</i> ..... | 78        |
| 2.5 <i>Pigmentos</i> .....  | 78        |
| 2.6 <i>Atividade da Redutase do nitrato (EC 1.7.99.4)</i> .....   | 78        |
| 2.7 <i>Análises de compostos nitrogenados</i> .....   | 79        |
| 2.7.1 <i>Nitrato</i> .....  | 79        |
| 2.7.2 <i>Amônia</i> .....   | 79        |
| 2.7.3 <i>Aminoácidos</i> .....  | 79        |
| 2.8 <i>Quantificação de açúcares em HPLC</i> .....  | 79        |
| 2.9 <i>Análises biométricas</i> .....   | 80        |
| 2.10 <i>Análises estatísticas</i> .....   | 80        |
| <b>3 RESULTADOS</b> .....   | <b>80</b> |
| 3.1 <i>Concentração de MDA e Peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)</i> .....  | 80        |
| 3.2 <i>Enzimas antioxidantes e conteúdo proteico</i> .....  | 80        |
| 3.3 <i>Metabolismo do Nitrogênio</i> .....  | 81        |
| 3.4 <i>Pigmentos fotossintéticos</i> .....  | 81        |
| 3.5 <i>Quantificação de açúcares nas folhas e crescimento</i> .....   | 82        |
| 3.6 <i>Quantificação de açúcares no caldo</i> .....   | 82        |
| 3.7 <i>Heatmap e PCA</i> .....  | 82        |
| 3.8 <i>Análise Se em folhas</i> .....   | 83        |
| <b>4 DISCUSSÃO</b> .....  | <b>83</b> |
| <b>5 CONCLUSÃO</b> .....  | <b>85</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....  | <b>86</b> |

|   |  |            |
|---|--|------------|
| <b>CAPÍTULO IV: O SELÊNIO PROMOVE ALTERAÇÕES EM FOLHAS E RAÍZES DE CANA-DE-AÇÚCAR PROPICIANDO MAIOR CRESCIMENTO DAS PLANTAS .....</b> |  | <b>105</b> |
| <b>1</b>  | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                    | <b>106</b> |
| <b>2</b>  | <b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                             | <b>107</b> |
|   | <i>2.1 Instalação e condução do experimento .....</i>      | <i>107</i> |
|   | <i>2.2 Anatomia foliar e radicular .....</i>               | <i>108</i> |
|   | <i>2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....</i> | <i>108</i> |
|   | <i>2.4 Análise nutricional.....</i>                        | <i>109</i> |
|   | <i>2.5 Análises estatísticas .....</i>                     | <i>109</i> |
| <b>3</b>  | <b>RESULTADOS.....</b>                                     | <b>109</b> |
|   | <i>3.1 Número de estômatos na epiderme foliar.....</i>     | <i>109</i> |
|   | <i>3.2 Anatomia foliar e radicular .....</i>               | <i>109</i> |
|   | <i>3.3 Crescimento e desenvolvimento .....</i>             | <i>110</i> |
|   | <i>3.4 Concentração de Se nas folhas .....</i>             | <i>111</i> |
|   | <i>3.5 Heatmap.....</i>                                    | <i>111</i> |
| <b>4</b>  | <b>DISCUSSÃO .....</b>                                     | <b>111</b> |
| <b>5</b>  | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                     | <b>114</b> |
|   | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                   | <b>114</b> |
|   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                          | <b>129</b> |

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

*Saccharum officinarum* L. (cana-de-açúcar) é uma gramínea semi-perene pertencente à família Poaceae, sendo uma das espécies domesticada do gênero *Saccharum* (D'HONT *et al.*, 1998), com cultivo nas regiões tropicais e subtropicais do globo (JAMES, 2004) e chega a ser cultivada em aproximadamente 100 países (EL CHAMI; DACCACHE; EL MOUJABBER, 2020). Importante fonte alimentar e bioenergética, tem grande efeito na economia de vários países (MOORE; PATERSON; TEW, 2013), se destacando principalmente por sua alta produtividade, por suas respostas eficientes à aplicação de insumos agrícolas e sua versatilidade como matéria-prima (MOORE; PATERSON; TEW, 2013). A utilização da cana-de-açúcar como adoçante é referenciada em um período de aproximadamente 2500 anos atrás, tendo sido na China a região onde se iniciou a produção de açúcar tendo como matéria prima a cultura e tendo seu cultivo como um dos mais antigos do Mundo (JAMES, 2004).

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar, tendo uma área estimada de 8.3 milhões de hectares (CONAB, 2021) e teve sua produção aumentada significativamente nas últimas décadas devido a busca pela utilização de energias renováveis frente à atual situação das mudanças climáticas e à excessiva utilização de combustíveis fósseis (BORDONAL *et al.*, 2018), sendo responsável por aproximadamente 39% da produção global (ARUNA *et al.*, 2021). A produção de cana-de-açúcar, apesar de favorecer o meio ambiente pela facilitação na substituição de combustíveis fósseis (ZUURBIER; VAN DE VOOREN, 2008), sofre com as mudanças climáticas, pois a cultura é bastante afetada pelo estresse abiótico, principalmente pelo frio e pela falta de água (ALTPETER; ORABY, 2010).

O selênio (Se) é um elemento que tem papel fundamental em diversas reações metabólicas no corpo humano (TRIPPE; PILON-SMITS, 2021), sendo essencial aos animais e mamíferos, e com efeito benéfico ao metabolismo vegetal (DOS REIS *et al.*, 2017; LANZA; REIS, 2021; WHITE, 2018). A essencialidade do Se para os humanos está ligada principalmente às selenoproteínas, com 25 atualmente conhecidas, que apresentam diversas funções, como a eliminação de radicais livres do meio celular, aumento das respostas imunológicas, garantia de um funcionamento adequado da tireoide e da espermatogênese, e respostas antioxidativas nos processos de formação de células cancerígenas (RAYMAN, 2012; TRIPPE; PILON-SMITS, 2021). Uma alimentação deficiente em Se, que se mostra comum em vários países (DOS REIS *et al.*, 2017;

LANZA; REIS, 2021), pode causar desenvolvimento inadequado do cérebro, aumentar a mortalidade em pacientes com infecção avançada por HIV, diminuir a fertilidade masculina (RAYMAN, 2012; TRIPPE; PILON-SMITS, 2021), desregular o funcionamento da tireoide, tecido com maior concentração de Se no corpo humano (RAYMAN, 2012; SCHOMBURG; KÖHRLE, 2008; TRIPPE; PILON-SMITS, 2021).

Em relação ao papel benéfico que o Se desempenha no metabolismo vegetal, se destaca o aumento da tolerância ao estresse abiótico induzido pelo mineral (DOS REIS *et al.*, 2017; FENG; WEI; TU, 2013; HASANUZZAMAN *et al.*, 2020; LANZA; REIS, 2021; WHITE, 2018). Em pequenas concentrações, a aplicação de Se pode mitigar os efeitos do estresse abiótico provocado pelo frio (LIU *et al.*, 2021), calor (ANDRADE *et al.*, 2018; DJANAGUIRAMAN; PRASAD; SEPPANEN, 2010), seca (SEREGINA; NILOVSKAYA; OSTAPENKO, 2001), salinidade (DESOKY *et al.*, 2021; GHASEMIAN *et al.*, 2021) e até por metais pesados (Lin *et al.*, 2012; Saidi *et al.*, 2014; Shahid *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2016). Esse aumento da tolerância mediado pelo Se é explicado principalmente pela ativação do complexo antioxidativo (HASANUZZAMAN *et al.*, 2020; WHITE, 2018), por meio do aumento da atividade de enzimas como a SOD (superóxido dismutase), a CAT (catalase), a APX (ascorbato peroxidase), GR (glutathione redutase) e diminuição da peroxidação lipídica pelo controle da concentração do MDA (malondialdeído) e eliminação de ERO's (espécies reativas de oxigênio) como o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (peróxido de hidrogênio) e o O<sub>2</sub><sup>-</sup> (superóxido) (LANZA; REIS, 2021).

O Se ainda induz o aumento do metabolismo de N, por meio do aumento da atividade das enzimas GS (glutamina sintase), da GOGAT (glutamato sintase) (RÍOS *et al.*, 2010) e da nitrato redutase (RÍOS *et al.*, 2010; SHAHID *et al.*, 2019), importantes enzimas no processo de assimilação do nutriente. Além disso, provoca aumento na concentração de N reduzido (aminoácidos e proteínas) em folhas e nos grãos (LIDON *et al.*, 2018; MATEUS *et al.*, 2021; RÍOS *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2019, 2021). Aliados ao aumento das taxas de assimilação de N, estão as taxas de aumento de açúcares (LIU *et al.*, 2021; SHAHID *et al.*, 2019) e de pigmentos fotossintéticos (ASTANEH *et al.*, 2018; CHEN *et al.*, 2008; DONG *et al.*, 2013; LANZA *et al.*, 2021; MATEUS *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2020), provocando maiores taxas de crescimento, produtividade e muitas vezes, aumento da tolerância ao estresse abiótico (LIU *et al.*, 2021; SHAHID *et al.*, 2019).

de biofortificação ou indução de tolerância ao estresse abiótico, conseguindo assim, a obtenção de seus efeitos benéficos ao metabolismo vegetal.

## 5. CONCLUSÃO

A aplicação do Se provocou modificações na anatomia foliar e radicular das variedades de cana-de-açúcar, o decréscimo na densidade estomática da epiderme adaxial da RB86 7515 com a aplicação de 5  $\mu\text{mol Se L}^{-1}$  pode ser uma excelente mecanismo frente ao estresse hídrico. Em relação à correlação entre as variáveis estudadas, a concentração de Se nas folhas apresentou correlação significativa com a densidade estomática na face abaxial, com a altura do feixe vascular na internervura foliar e com o ganho no diâmetro do colmo.

## REFERÊNCIAS

- APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. **Anatomia vegetal**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2006.
- ARAUJO, M. A.; LEITE, M. C. M.; CAMARGOS, L. S.; MARTINS, A. R. Tolerance evaluation and morphophysiological responses of *Astronium graveolens*, a native brazilian Cerrado, to addition of lead in soil. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Philadelphia, v. 195, p. 110524, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110524>
- BHATTACHARYA, A. Water-use efficiency under changing climatic conditions. In: BHATTACHARYA, A. **Changing climate and resource use efficiency in plants**. Kanpur: Elsevier, 2019. p. 111–180. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816209-5.00003-9>
- BORDONAL, R. de O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; DE FIGUEIREDO, E. B.; DE OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 38, n. 2, p. 13, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x>
- BOSABALIDIS, A. M.; KOFIDIS, G. Comparative effects of drought stress on leaf anatomy of two olive cultivars. **Plant Science**, Shannon, v. 163, n. 2, p. 375–379, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00135-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00135-8)
- BOZKURT, B. Heart failure as a consequence of dilated cardiomyopathy. In: MANN, D. L. (ed.). **Heart failure: a companion to braunwald's heart disease**. New York: Elsevier, 2011. p. 372–394. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4160-5895-3.10024-5>
- CABRAL GOUVEIA, G. C.; GALINDO, F. S.; DANTAS BERETA LANZA, M. G.; CAROLINE DA ROCHA SILVA, A.; PEREIRA DE BRITO MATEUS, M.; SOUZA DA SILVA, M.; RIMOLDI TAVANTI, R. F.; TAVANTI, T. R.; LAVRES, J.; REIS, A. R. dos. Selenium toxicity stress-induced phenotypical, biochemical and physiological responses in rice plants: Characterization of symptoms and plant metabolic adjustment. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Philadelphia, v. 202,

p. 110916, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110916>

CARRERA, C. S.; SOLÍS, S. M.; FERRUCCI, M. S.; VEGA, C. C. R.; GALATI, B. G.; ERGO, V.; ANDRADE, F. H.; LASCANO, R. H. Leaf structure and ultrastructure changes induced by heat stress and drought during seed filling in field-grown soybean and their relationship with grain yield. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 93, n. 4, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120191388>

CHARTZOULAKIS, K.; PATAKAS, A.; KOFIDIS, G.; BOSABALIDIS, A.; NASTOU, A. Water stress affects leaf anatomy, gas exchange, water relations and growth of two avocado cultivars. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 95, n. 1–2, p. 39–50, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(02\)00016-X](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(02)00016-X)

COPPINGER, R. J.; DIAMOND, A. M. Selenium deficiency and human disease. In: HATIFIELD, D. L. (ed.). **Selenium**. Boston: Springer, 2001. p. 219–233. *E-book*. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1609-5\\_18](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1609-5_18)

DJANAGUIRAMAN, M.; PRASAD, P. V. V.; SEPPANEN, M. Selenium protects sorghum leaves from oxidative damage under high temperature stress by enhancing antioxidant defense system. **Plant Physiology and Biochemistry**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 48, n. 12, p. 999–1007, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.09.009>

DJANAGUIRAMAN, M.; PRASAD, P. V. V.; BOYLE, D. L.; SCHAPAUGH, W. T. High-temperature stress and soybean leaves: leaf anatomy and photosynthesis. **Crop Science**, Hoboken, v. 51, n. 5, p. 2125–2131, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.2135/cropsci2010.10.0571>

DOS REIS, A. R.; EL-RAMADY, H.; SANTOS, E. F.; GRATÃO, P. L.; SCHOMBURG, L. Overview of selenium deficiency and toxicity worldwide: affected areas, selenium-related health issues, and case studies. In: PILON-SMITS, E. A. H.; WINKEL, H. E.; LIN, Z. Q. **Selenium in plants**. New York: Springer, 2017. p. 209–230. *E-book*. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56249-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56249-0_13)

EDWARDS, D.; KERP, H.; HASS, H. Stomata in early land plants: an anatomical and ecophysiological approach. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 49, n. Special, p. 255–278, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1093/jxb/49.Special\\_Issue.255](https://doi.org/10.1093/jxb/49.Special_Issue.255)

FAHN, A.; CUTLER, D. F. **Xerophytes**. Berli: Gebruder Borntraeger, 1992.

FRANKS, P.; BRODRIBB, T. J. Stomatal control and water transport in the xylem. In: HOLBROOK, N. M.; ZWIENIECKI, M. A. **Vascular transport in plants**. New York: Elsevier, 2005. p. 69–89. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-012088457-5/50006-X>

GOYENS, P.; GOLSTEIN, J.; NSOMBOLA, B.; VIS, H.; DUMONT, J. E. Selenium deficiency as a possible factor in the pathogenesis of myxoedematous endemic cretinism. **Acta Endocrinologica**, Bucharest, v. 114, n. 4, p. 497–502, 1987. Disponível em: <https://doi.org/10.1530/acta.0.1140497>

GRIGORE, M.-N.; TOMA, C. Bulliform cells. In: GRIGORE, M. N.; TOMA, C. (ed.).

- Anatomical adaptations of halophytes.** Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 325–338. *E-book*. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-66480-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66480-4_8)
- GUPTA, M.; GUPTA, S. An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 7, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02074>
- GUPTA, U. C.; GUPTA, S. C. Selenium in soils and crops, its deficiencies in livestock and humans: implications for management. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 31, n. 11–14, p. 1791–1807, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103620009370538>
- HABERLANDT, G. **Physiological plant anatomy**. [S.l.]: Macmillan and Company, 1914.
- HAWORTH, M.; ELLIOTT-KINGSTON, C.; MCELWAIN, J. C. Stomatal control as a driver of plant evolution. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, n. 8, p. 2419–2423, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/err086>
- HORRIDGE, G. A.; TAMM, S. L. Critical point drying for scanning electron microscopic study of ciliary motion. **Science**, Washington, v. 163, n. 3869, p. 817–818, 1969. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.163.3869.817>
- HUANG, J.; KHAN, M. T.; PERECIN, D.; COELHO, S. T.; ZHANG, M. Sugarcane for bioethanol production: potential of bagasse in Chinese perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 133, p. 110296, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110296>
- HUGHES, D. J. *et al.* Selenium status is associated with colorectal cancer risk in the European prospective investigation of cancer and nutrition cohort. **International Journal of Cancer**, Hoboken, v. 136, n. 5, p. 1149–1161, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ijc.29071>
- JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**. New York: McGraw-Hill, 1940.
- KIRKHAM, M. B. Stomatal Anatomy and Stomatal Resistance. *In*: KIRKHAM, M. B. **Principles of soil and plant water relations**. New York: Elsevier, 2014. p. 431–451. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420022-7.00024-0>
- LANZA, M. G. D. B.; REIS, A. R. dos. Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses. **Plant Physiology and Biochemistry**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 164, p. 27–43, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.026>
- LANZA, M. G. D. B.; SILVA, V. M.; MONTANHA, G. S.; LAVRES, J.; PEREIRA DE CARVALHO, H. W.; REIS, A. R. dos. Assessment of selenium spatial distribution using  $\mu$ -XFR in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) plants: Integration of physiological and biochemical responses. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Philadelphia, v. 207, p. 111216, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111216>
- LAWSON, T.; MATTHEWS, J. Guard Cell Metabolism and Stomatal Function. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 71, n. 1, p. 273–302, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100251>

LEITE, M. C. M.; DE ARAUJO, M. A.; DA SILVA DE PAIVA, W.; CAMARGOS, L. S.; MARTINS, A. R. Morphological responses and tolerance of a tree native to the Brazilian Cerrado *Astronium fraxinifolium* Schott to boron toxicity. **Environmental Science and Pollution Research**, Heidelberg, v. 29, p. 6900-6910, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15710-8>

LEONARDOS, E. D.; GRODZINSKI, B. Photosynthesis and Productivity of Vascular Plants in Controlled and Field Environments. *In: Reference module in life sciences*. Elsevier, 2017. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.09199-8>

LOPEZ, F. B.; BARCLAY, G. F. Plant anatomy and physiology. *In: BADAL, S.; DELGODA, R. Pharmacognosy*. New York: Elsevier, 2017. p. 45–60. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802104-0.00004-4>

MALIK, J. A. *et al.* Promotion of growth in mungbean (*Phaseolus aureus* Roxb.) by selenium is associated with stimulation of carbohydrate metabolism. **Biological Trace Element Research**, Heidelberg, v. 143, n. 1, p. 530–539, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8872-1>

MANGENA, P. Water stress: morphological and anatomical changes in soybean (*Glycine max* L.) plants. *In: ANDJELKOVIC, V. Plant, abiotic stress and responses to climate change*. New York: InTech, 2018. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.72899>

MATEUS, M. P. de B.; TAVANTI, R. F. R.; TAVANTI, T. R.; SANTOS, E. F.; JALAL, A.; REIS, A. R. dos. Selenium biofortification enhances ROS scavenge system increasing yield of coffee plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Philadelphia, v. 209, p. 111772, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111772>

MENCUCCINI, M. Water relations of plants | Xylem. *In: Encyclopedia of applied plant sciences*. New York: Elsevier, 2003. p. 1440–1449. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B0-12-227050-9/00107-1>

PALLARDY, S. G. Absorption of water and ascent of sap. *In: KRAMER, P. (ed.). Physiology of woody plants*. New York: Elsevier, 2008. p. 287–323. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-012088765-1.50012-9>

RAYMAN, M. P. The importance of selenium to human health. **The Lancet**, London, v. 356, n. 9225, p. 233–241, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(00\)02490-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)02490-9)

RAYMAN, M. P. Selenium and human health. **The Lancet**, London, v. 379, n. 9822, p. 1256–1268, 2012. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)61452-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)61452-9)

RÍOS, J. J.; BLASCO, B.; ROSALES, M. A.; SANCHEZ-RODRIGUEZ, E.; LEYVA, R.; CERVILLA, L. M.; ROMERO, L.; RUIZ, J. M. Response of nitrogen metabolism in lettuce plants subjected to different doses and forms of selenium. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Oxford, v. 90, n. 11, p. 1914–1919, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jsfa.4032>

ROSALEM, P. F.; PICÃO, T. B.; RODRIGUES-LISONI, F. C.; MARTINS, A. R. Leaf anatomy of *Protium ovatum* and its antiproliferative potential in cervical cells. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, Curitiba, v. 27, n. 6, p. 673–678, 2017. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.bjp.2017.09.001>

SAKAI, W. S. Simple method for differential staining of paraffin embedded plant material using toluidine blue O. **Stain Technology**, Abingdon, v. 48, n. 5, p. 247–249, 1973. Disponível em: <https://doi.org/10.3109/10520297309116632>

SAM, O.; JERÉZ, E.; DELL'AMICO, J.; RUIZ-SANCHEZ, M. C. Water stress induced changes in anatomy of tomato leaf epidermes. **Biologia Plantarum**, Prague, v. 43, n. 2, p. 275–277, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1002716629802>

SCHIAVON, M.; NARDI, S.; DALLA VECCHIA, F.; ERTANI, A. Selenium biofortification in the 21st century: status and challenges for healthy human nutrition. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 453, n. 1–2, p. 245–270, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04635-9>

SHAHID, M. A.; BALAL, R. M.; KHAN, N.; ZOTARELLI, L.; LIU, G. D.; SARKHOSH, A.; FERNÁNDEZ-ZAPATA, J. C.; MARTÍNEZ NICOLÁS, J. J.; GARCIA-SANCHEZ, F. Selenium impedes cadmium and arsenic toxicity in potato by modulating carbohydrate and nitrogen metabolism. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Philadelphia, v. 180, p. 588–599, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.037>

SILVA, M. de A.; SILVA, J. A. G. da; ENCISO, J.; SHARMA, V.; JIFON, J. Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n. 6, p. 620–627, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000600008>

SILVA, V. M. *et al.* Physiological, biochemical, and ultrastructural characterization of selenium toxicity in cowpea plants. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 150, p. 172–182, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.03.020>

SILVA, V. M.; RIMOLDI TAVANTI, R. F.; GRATÃO, P. L.; ALCOCK, T. D.; REIS, A. R. dos. Selenate and selenite affect photosynthetic pigments and ROS scavenging through distinct mechanisms in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) walp) plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Philadelphia, v. 201, p. 110777, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110777>

SMITH, L. D.; GARG, U. Disorders of trace metals. *In*: GARG, U.; SMITH, L. D. **Biomarkers in inborn errors of metabolism**. New York: Elsevier, 2017. p. 399–426. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802896-4.00015-8>

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

THOMAS, C. L. *et al.* Root morphology and seed and leaf ionomic traits in a Brassica napus L. diversity panel show wide phenotypic variation and are characteristic of crop habit. **BMC Plant Biology**, London, v. 16, n. 1, p. 214, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0902-5>

ULHASSAN, Z.; GILL, R. A.; ALI, S.; MWAMBA, T. M.; ALI, B.; WANG, J.; HUANG, Q.; AZIZ, R.; ZHOU, W. Dual behavior of selenium: Insights into physio-biochemical, anatomical and molecular analyses of four Brassica napus cultivars. **Chemosphere**, Oxford, v. 225, p. 329–341, 2019 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.028>

ULHASSAN, Z.; GILL, R. A.; HUANG, H.; ALI, S.; MWAMBA, T. M.; ALI, B.; HUANG, Q.; HAMID, Y.; KHAN, A. R.; WANG, J.; ZHOU, W. Selenium mitigates the chromium toxicity in *Brassica napus* L. by ameliorating nutrients uptake, amino acids metabolism and antioxidant defense system. **Plant Physiology and Biochemistry**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 145, p. 142–152, 2019 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.10.035>

WHITE, P. J. Ion transport. *In: Encyclopedia of Applied Plant Sciences*. New York: Elsevier, 2017. p. 238–245. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00216-1>

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

WHITE, P. J.; BROWN, P. H. Plant nutrition for sustainable development and global health. **Annals of Botany**, Oxford, v. 105, n. 7, p. 1073–1080, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/aob/mcq085>

ZHAO, D.; LI, Y.-R. Climate change and sugarcane production: potential impact and mitigation strategies. **International Journal of Agronomy**, London, v. 2015, p. 1–10, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2015/547386>