

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Efeito da utilização de prolina na tolerância ao estresse hídrico na cultura  
de soja**

**Gabriel Ferreira Barcelos**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

**Piracicaba  
2022**

**Gabriel Ferreira Barcelos**  
**Engenheiro Agrônomo**

**Efeito da utilização de prolina na tolerância ao estresse hídrico na cultura de soja**

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:  
Prof. Dr. **DURVAL DOURADO NETO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

**Piracicaba**  
**2022**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**  
**DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Barcelos, Gabriel Ferreira

Efeito da utilização de prolina na tolerância ao estresse hídrico na cultura de soja / Gabriel Ferreira Barcelos. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2022.

86 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. *Glycine max* 2. Sistemas de produção 3. Bioestimulante I. Título

## DEDICATÓRIA

Dedico a DEUS pelo dom da vida, pela fé e perseverança para vencer os obstáculos.

Aos meus pais, Liliane e Geraldo Lúcio, pelo amor, carinho, pela confiança e luta, para que mais uma conquista fosse alcançada. Sem nossa união, nada seria consolidado.

À minha irmã Gabriela, pela grande amizade, pelo companheirismo, pela cumplicidade, pelos sorrisos que me apoiaram nesta fase cumprida.

A vocês, meu sincero amor.

**Dedico**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que me ilumina e se faz presente em tudo o que faço.

À minha família, em especial aos meus pais, Liliane Ferreira da Silva Barcelos e Geraldo Lúcio de Barcelos, e à minha irmã Gabriela Ferreira Barcelos, que sempre me acompanharam e foram meu grande suporte durante todos os momentos dessa jornada, fossem eles de conquistas ou provações.

Ao professor Dr. Durval Dourado Neto, por acreditar no meu potencial, pela amizade, orientação, paciência e contribuição pessoal para o meu desenvolvimento e do trabalho.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, instituição a qual sinto orgulho em pertencer, pelo apoio durante o Curso de Pós-Graduação em Ciências (área de concentração em Fitotecnia).

À empresa Agrocères Binova, pelo apoio, parceria, disponibilidade e atenção durante o Curso de Pós-Graduação em Ciências (área de concentração em Fitotecnia) em especial ao Thiago Ferreira Goncalves Delgado e Urbano Campos Ribeiral Júnior. Sinto muito orgulho em fazer parte do time Agrocères.

Aos parceiros de trabalho pela colaboração durante a condução dos experimentos, em especial ao Ednei Dombiski, Gabriel Rubin Vasconcelos, Denner Júnio Barbosa, Tulio Urban Lourenco M. Silva, Layse Batista Oliveira, Isabella Tavares de Oliveira Silva, Roberta G. N. Guimarães Azevedo e Adolfo Luís dos Santos.

Aos meus amigos pela parceria, paciência, e incentivo em todos os momentos e que de uma forma ou de outra colaboraram para o término de mais uma etapa, em especial ao Matheus Martins de Sousa, Matheus Resende Aparecido, Franny Christiny Camargo e Luiz Felipe Borges.

Aos amigos da Pós-Graduação pelos bons momentos vivenciados e por todo apoio durante o curso, em especial a Larissa Fernanda Muniz e Bruno Bachiega Navarro.

Aos professores da Esalq/USP pelas experiências e ensinamentos repassados, fundamentais para a minha formação, em especial aos Professores Pedro Jacob Christoffoleti, Silvio Moure Cícero, Lázaro Eustáquio Pereira Peres, Paulo José Pereira Lima Teixeira e a Sônia Maria de Stefano Piedade, pela paciência e contribuição nas análises estatísticas.

## EPÍGRAFE

*Um tempo que aprendi a entender as coisas do mar, a conversar com as grandes ondas e não discutir com o mau tempo. A transformar o medo em respeito, o respeito em confiança. Descobri como é bom chegar quando se tem paciência. E, para se chegar, onde quer que seja, aprendi que não é preciso dominar a força, mas a razão. É preciso, antes de mais nada, querer.*

*(Amyr Klink)*

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>12</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
2.1 Quantificação do tema.....	15
2.2 A cultura de soja e sua importância .....	16
2.3 Cultivo de soja, elementos do clima e estresse .....	19
2.4 Efeitos das mudanças climáticas .....	23
2.5 Aminoácidos nas plantas.....	25
2.6 Prolina e estresse .....	26
<b>3 MATERIAIS E MÉTODO.....</b>	<b>31</b>
3.1 Ambientes e locais .....	31
3.1.1 Experimento I: Capinópolis, MG.....	31
3.1.2 Experimento II: Sorriso, MT.....	31
3.2 Clima.....	31
3.2.1 Experimento I: Capinópolis, MG.....	31
3.2.2 Experimento II: Sorriso, MT.....	31
3.3 Substrato e solo .....	31
3.3.1 Experimento I: Substrato .....	31
3.3.2 Experimento II: Solo.....	33
3.4 Tratamento de sementes .....	34
3.5 Produtos a serem testados .....	34
3.6 Cultivar.....	34
3.7 Controle de plantas daninhas, pragas e doenças .....	34
3.8 Delineamento estatístico e parcela experimental .....	35
3.8.1 Experimento I.....	35
3.8.2 Experimento II .....	35
3.9 Descrição dos tratamentos.....	36
3.9.1 Experimento I.....	36
3.9.2 Experimento II .....	38

3.10 Variáveis analisadas.....	38
3.10.1 Massa de matéria seca .....	38
3.10.2 Altura de planta e diâmetro da haste .....	39
3.10.3 Teor de clorofila .....	39
3.10.4 Índice de área foliar .....	39
3.10.5 Análises bioquímicas .....	40
3.10.6 Componentes de produção e produtividade.....	41
3.11 Análise estatística .....	42
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>43</b>
4.1.1 Massa de matéria seca .....	43
4.1.2 Altura de planta .....	49
4.1.3 Diâmetro da haste .....	52
4.1.4 Teor de clorofila total .....	55
4.1.5 Índice de área foliar .....	58
4.1.6 Análises bioquímicas (Experimento I) .....	61
4.1.7 Componentes de produção e produtividade.....	64
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>71</b>

## RESUMO

### Efeito da utilização de prolina na tolerância ao estresse hídrico na cultura de soja

Com o objetivo de avaliar o efeito da aplicação exógena da prolina na tolerância ao estresse hídrico da cultura de soja, foram instalados os Experimentos em Capinópolis, MG (Experimento I: casa-de-vegetação) e em Sorriso, MT (Experimento II: campo) no período de outubro de 2021 a fevereiro de 2022. Os experimentos foram conduzidos em delineamento em blocos casualizados. No Experimento I, os tratamentos foram constituídos pela aplicação prolina (5  $\mu$ M) nos estádios [V<sub>4</sub>], [R<sub>1</sub>] e [V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub>] utilizando dez tratamentos com quatro blocos. No Experimento II, foram utilizados quatro tratamentos e seis blocos, totalizando 24 parcelas. As aplicações foram realizadas utilizando pulverizador pressurizado de CO<sub>2</sub>, equipado com barra lateral de fibra de carbono com 6 pontas espaçadas de 0,5 m. Para ambos os experimentos foram realizadas avaliações de massa de matéria seca de haste, folha e vagem, diâmetro da haste, altura de planta, teor de clorofila, índice de área foliar, componentes de produção e produtividade. Adicionalmente para o Experimento I foi realizada análises bioquímicas (atividade da enzima peroxidase e teor de prolina) e massa de matéria seca da raiz. Em campo, as culturas estão submetidas à exposição de inúmeras condições adversas, incluindo a deficiência hídrica, que afeta drasticamente o crescimento e a produtividade da cultura de soja. Diante das condições estressantes, as plantas são capazes de recorrer a mecanismos de ajustes para diminuir os danos causados por esses fatores, como é o caso da prolina, aminoácido que age como osmorregulador, antioxidante e protetor da atividade enzimática. Nestes experimentos, os dados foram submetidos à análise de variância com a realização de teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a aplicação de prolina, ao longo do ciclo da cultura (estádios fenológicos V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub>), influenciou no melhor desenvolvimento radicular (casa-de-vegetação), massa de matéria seca da folha (casa-de-vegetação), massa de matéria seca de haste (casa-de-vegetação), altura de planta (campo), diâmetro de haste (casa-de-vegetação), índice de área foliar (casa-de-vegetação e campo), teor de prolina (casa-de-vegetação), e componentes de produção (número de vagens por planta - campo), bem com apresentou uma tendência de aumento de produtividade de grãos de soja (casa-de-vegetação e campo).

Palavras-chave: *Glycine max*, Sistemas de produção, Bioestimulante

## ABSTRACT

### **Effect of proline use on water stress tolerance in soybean**

With the purpose of evaluating the effect of exogenous application of proline on the tolerance to water stress of soybean, two experiments were carried out in 'Capinópolis', Minas Gerais state (Experiment I: greenhouse) and in 'Sorriso', Mato Grosso state (Experiment II: field) from October 2021 to February 2022. The experiments were carried out in a randomized block design. In the Experiment I, the treatments were constituted by the application of proline (5  $\mu$ M) in the stages [V<sub>4</sub>], [R<sub>1</sub>] and [V<sub>4</sub> and R<sub>1</sub>] using ten treatments with four blocks. In the Experiment II, four treatments and six blocks were used, totaling 24 plots. The applications were carried out using a pressurized CO<sub>2</sub> sprayer, equipped with a carbon fiber sidebar with 6 nozzles spaced 0.5 m apart. For both experiments, evaluations of stem, leaf and pod dry matter mass, stem diameter, plant height, chlorophyll content, leaf area index, yield components and productivity were carried out. Additionally, for Experiment I, biochemical analyzes were performed (peroxidase enzyme activity and proline content) and root dry matter mass. In the field, crops are exposed to numerous adverse conditions, including water deficiency, which drastically affects the growth and productivity of soybean crop. In the face of stressful conditions, plants are able to resort to adjustment mechanisms to reduce the damage caused by these factors, such as proline, an amino acid that acts as an osmoregulator, antioxidant and protector of enzymatic activity. In these experiments, the data were submitted to analysis of variance with the performance of Tukey's test at a significance level of 5%. Based on the results obtained, it can be concluded that the application of proline throughout the crop cycle (phenological stages V<sub>4</sub> and R<sub>1</sub>) influenced better root development (greenhouse), leaf dry matter weight (greenhouse), stem dry matter mass (greenhouse), plant height (field), stem diameter (greenhouse), leaf area index (greenhouse and field), proline content (greenhouse), and production components (number of pods per plant - field) and as well as presented a tendency to increase soybean yield (greenhouse and field).

Keywords: *Glycine max*, Production systems, Biostimulant

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Estrutura geral de um aminoácido. Fonte: Teixeira (2016). Legenda: R – Radical orgânico; H – Hidrogênio; N – Nitrogênio; C – Carbono; O – Oxigênio.....26
- Figura 2. Massa de matéria seca de raiz de soja (MSr, kg ha<sup>-1</sup>) no estágio fenológico R<sub>2</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5µM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Capinópolis, MG, safra 2021-2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV: 13,99. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.....44
- Figura 3. Massa de matéria seca de folha de soja (MSr, kg ha<sup>-1</sup>) nos estádios fenológicos V<sub>6</sub> e R<sub>2</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5µM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Capinópolis, MG, safra 2021-2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV-V<sub>6</sub>: 10,79; CV-R<sub>2</sub>: 8,31. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.....46
- Figura 4. Massa seca de folha de soja (MSf, kg ha<sup>-1</sup>) nos estádios fenológicos V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5µM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Sorriso – MT, safra 2021-2022. Experimento II: Campo. CV-V<sub>8</sub>: 5,59; CV-R<sub>5.1</sub>: 20,88. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.....47
- Figura 5. Massa de matéria seca de haste de soja (MSh, kg ha<sup>-1</sup>) nos estádios fenológicos V<sub>6</sub> e R<sub>2</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5µM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Capinópolis, MG, safra 2021-2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV-V<sub>6</sub>: 10,87; CV-R<sub>2</sub>: 10,22. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.....48
- Figura 6. Massa de matéria seca de haste de soja (MSh, kg ha<sup>-1</sup>) nos estádios fenológicos V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5µM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Sorriso – MT, safra 2021-2022. Experimento II: Campo. CV-V<sub>6</sub>: 8,97; CV-R<sub>2</sub>: 22,58. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.....49
- Figura 7. Altura de planta de soja (H, cm) nos estádios fenológicos estádios fenológicos V<sub>6</sub>, V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5µM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Capinópolis, MG, safra 2021-2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV-V<sub>6</sub>: 15,67; CV-V<sub>8</sub>: 15,95; CV-R<sub>5.1</sub>: 12,11. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.....50
- Figura 8. Altura de planta de soja (H, cm) nos estádios fenológicos V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5µM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Sorriso – MT, safra 2021-2022. Experimento II: Campo. CV-V<sub>6</sub>: 5,23; CV-R<sub>2</sub>: 2,59. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.....51
- Figura 9. Diâmetro da haste de plantas de soja (Dh, mm). nos estádios fenológicos estádios fenológicos V<sub>6</sub>, V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5µM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Capinópolis, MG, safra 2021-2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV-V<sub>6</sub>: 7,77; CV-V<sub>8</sub>: 6,93; CV-R<sub>5.1</sub>: 9,9. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.....53
- Figura 10. Diâmetro da haste de plantas de soja (Dh, mm) nos estádios fenológicos V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5µM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Sorriso – MT, safra 2021-2022. Experimento II: Campo. CV-V<sub>6</sub>: 5,70; CV-R<sub>2</sub>: 5,02. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.....55

Figura 11. Teor de Clorofila Total em folhas de plantas de soja (TcT), nos estádios fenológicos estádios fenológicos  $V_6$ ,  $V_8$  e  $R_{5.1}$ . Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com  $5\mu\text{M}$  de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Capinópolis, MG, safra 2021-2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV- $V_6$ : 7,32; CV- $V_8$ : 14,54; CV- $R_{5.1}$ : 7,72. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ), ns: não significativo entre os tratamentos.....56

Figura 12. Teor de clorofila total em folhas de plantas de soja (TcT,  $\text{mg cm}^{-2}$ ) nos estádios fenológicos  $V_8$  e  $R_{5.1}$ . Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com  $5\mu\text{M}$  de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Sorriso – MT, safra 2021-2022. Experimento II: Campo. CV- $V_6$ : 2,92; CV- $R_2$ : 2,95. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ), ns: não significativo entre os tratamentos.....57

Figura 13. Índice de área foliar de plantas de soja (IAF,  $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ) nos estádios fenológicos estádios fenológicos  $V_6$  e  $R_2$ . Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com  $5\mu\text{M}$  de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Capinópolis, MG, safra 2021-2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV- $V_6$ : 14,34; CV- $R_2$ : 11,34. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ), ns: não significativo entre os tratamentos.....59

Figura 14. Índice de área foliar de plantas de soja (IAF,  $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ) nos estádios fenológicos  $V_8$  e  $R_{5.1}$ . Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com  $5\mu\text{M}$  de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Sorriso – MT, safra 2021-2022. Experimento II: Campo. CV- $V_8$ : 13,21; CV- $R_{5.1}$ : 18,39. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ), ns: não significativo entre os tratamentos.....60

Figura 15. Teor de peroxidase em folha de planta de soja (POD,  $\mu\text{mol}$  [purpurogalina]  $\text{min}^{-1} \text{mg}^{-1}$  [Proteína]) no estádio fenológico  $R_2$ . Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com  $5\mu\text{M}$  de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Capinópolis, MG, safra 2021-2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV: 30,12. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ), ns: não significativo entre os tratamentos.....62

Figura 16. Teor de prolina em folha de planta de soja (Prolina,  $\mu\text{mol g}^{-1}$ [MF]) no estádio fenológico  $R_2$ . Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com  $5\mu\text{M}$  de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Capinópolis, MG, safra 2021-2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV: 24,61. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ), ns: não significativo entre os tratamentos.....64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Quantificação das palavras-chave associadas ao título desta Dissertação nos portais de pesquisa ‘Google acadêmico’ e ‘SciELO’ utilizando diferentes palavras-chave na língua portuguesa em 17 de outubro de 2022.....	15
Tabela 2. Quantificação das palavras-chave associadas ao título desta Dissertação nos portais de pesquisa ‘Google acadêmico’ e ‘SciELO’ utilizando diferentes palavras-chave na língua inglesa em 17 de outubro de 2022.....	16
Tabela 3. Estádios fenológicos da cultura soja.....	18
Tabela 4. Caracterização química de um Latossolo Vermelho amostrado na profundidade de 0 a 0,2 m. Capinópolis, MG, 2021.....	32
Tabela 5. Composição granulométrica de um Latossolo Vermelho amostrado na profundidade de 0,0 a 0,2 m. Capinópolis, MG, 2021.....	33
Tabela 6. Caracterização química de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (LVd) amostrado na profundidade de 0 a 0,2 m. Sorriso, MT, 2021.....	33
Tabela 7. Composição granulométrica de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (LVd) amostrado na profundidade de 0 a 0,2 m. Sorriso, MT, 2021.....	33
Tabela 8. Delineamento estatístico (Delineamento em blocos casualizados) e descrição sucinta dos experimentos. Soja. Cultivar: Brasmax-Extra-IPRO.....	35
Tabela 9. Imposição do estresse hídrico e descrição dos tratamentos em casa-de-vegetação. Soja.....	36
Tabela 10. Descrição dos tratamentos no campo com a aplicação de prolina em diferentes estádios. Experimento II. Sorriso, MT.....	38
Tabela 11. Número de vagens por planta de soja ( $N_{vp}$ , vagens planta <sup>-1</sup> ), Número de grãos por vagem de soja ( $N_{gv}$ , grãos vagem <sup>-1</sup> ), Massa de 1000 grãos de soja ( $M_{1000}$ , g) e Produtividade de grãos de soja ( $P$ , kg ha <sup>-1</sup> ), nos diferentes tratamentos (Tr). Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Aplicação exógena de prolina (5 $\mu$ M). Capinópolis, MG. Safra 2021/2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. $CV_{N_{vp}}$ : 17,58; $CV_{N_{gv}}$ : 6,04; $CV_{M_{1000}}$ : 11,83; $CV_P$ : 22,95. Capinópolis, MG.....	65
Tabela 12. Número de nós da haste principal de plantas de soja ( $NNHP$ , nós haste <sup>-1</sup> ), Distância do entrenó (DEN, cm), Número de vagens por planta de soja ( $N_{vp}$ , vagens planta <sup>-1</sup> ) e Produtividade de grãos de soja ( $P$ , kg ha <sup>-1</sup> ) na colheita nos diferentes tratamentos (Tr). Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Aplicação exógena de prolina (5 $\mu$ M). Sorriso, MT. Safra 2021/2022. Experimento II: Campo. $CV_{NNHP}$ : 3,66; $CV_{DEN}$ : 5,05; $CV_{N_{vp}}$ : 3,74; $CV_P$ : 7,51.....	67

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com dados apresentados pela FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura) o ritmo de crescimento demográfico mundial nos últimos anos tem sido acima de 70 milhões de pessoas por ano. A previsão é que a população mundial em 2050 estará na ordem de 9,1 bilhões e, até ao final do século XXI, serão mais de 10 bilhões (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2016). Para satisfazer essa população, a FAO projeta que a produção de alimentos deve aumentar em pelo menos 70%. A produção de cereais terá que passar dos atuais 2,5 bilhões toneladas/ano para cerca de 3 bilhões toneladas/ano. Dessa forma, o cultivo de soja com poucas perdas nas etapas de produção e colheita é um gargalo muito importante para o sucesso da alimentação nos próximos anos. No ano de 2021 o Brasil se consolidou como o maior produtor mundial de soja, superando em 10 milhões de toneladas a produção da safra 2019/20, que havia alcançado 125 milhões de toneladas do grão (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2021).

A soja (*Glycine max* L. Merr.) tem origem de uma região de clima temperado com temperatura ideal para o cultivo e desenvolvimento entre 20°C e 30°C. Baixas temperaturas no solo no período de semeadura podem comprometer a emergência e locais com temperaturas inferiores a 10°C podem caracterizar uma região como imprópria para o desenvolvimento da cultura, uma vez que seu crescimento vegetativo e desenvolvimento são muito pequenos. O contrário também é verdadeiro, temperaturas superiores a 40°C trazem efeitos negativos como danos a floração e taxa de crescimento reduzido, o que pode ainda ser acentuado com associação de deficiência hídrica (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2013a,b).

As condições climáticas sofrerão mudanças nos próximos anos. O Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (2014) estima que na região do cerrado brasileiro a temperatura média do ar aumentará entre 5,0°C e 5,5°C até o ano de 2100 e redução nos índices pluviométricos em níveis entre 35% e 45%. Essas alterações influenciarão no zoneamento agrícola da soja em diversas localidades, visto que a produtividade está diretamente relacionada à temperatura e disponibilidade hídrica.

O *deficit* hídrico é o maior redutor da produção devido a distribuição irregular das chuvas e pela alta demanda de evaporação pela planta à atmosfera (ZIPPER, QIU; KUCHARIK, 2016), o que influenciam na perda de produtividade da cultura de soja Zanon et al. (2018). Em algumas regiões do país, a escassez hídrica associada às bruscas mudanças climáticas já tem impossibilitado o crescimento de algumas culturas, mesmo no período das

águas (MEIRELES et al., 2010; DUARTE et al., 2013). Métodos para mitigar os efeitos ocasionados pela seca podem ser divididos em três estratégias principais; (I) fuga de áreas de seca, (II) antecipação à seca com uso de cultivares precoces e, (III) cultivares tolerantes à seca (OSMOLOVSKAYA et al., 2018).

O ajuste osmótico é um dos mecanismos fisiológicos que podem ser manejados mais eficazmente visando a manutenção da turgência das células vegetais quando o potencial hídrico no solo é baixo, conferindo proteção a curto prazo quando as condições ideais não demorarem para voltar à normalidade (MARIJUAN; BOSCH, 2013). O controle osmótico ocasionado pela deficiência hídrica é um mecanismo fisiológico que estabelece o acúmulo vacuolar de solutos como a prolina, que possui a função de proteção durante estresses abióticos (JANGRA et al., 2017; FU et al., 2018). A prolina induz diferentes respostas fisiológicas que promovem maior capacidade da cultura em superar condições de estresses abióticos, onde é encontrada em altas concentrações quando as plantas estão submetidas a estresses (ARTEAGA et al., 2020). O aumento das concentrações intracelulares de prolina refletem o nível de estresse que as plantas estão sendo submetidas, pois esse aminoácido opera como osmorregulador, antioxidante e protetor da atividade enzimática (VERBRUGGEN; HERMANS, 2008; SZABADOS; SAVOURÉ, 2010).

A busca de tecnologias de manejo como o uso de aminoácidos, se torna uma estratégia muito importante para se elevar os índices de produtividade. Com isso, o presente trabalho teve por objetivo avaliar o efeito da aplicação foliar exógena de prolina visando o aumento da tolerância ao estresse hídrico na cultura de soja, cultivar Brasmax-Extra-IPRO em condições de casa-de-vegetação (Experimento I) e em condições de campo (Experimento II).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Quantificação do tema

Foram quantificadas as palavras-chave associadas ao título desta Dissertação intitulada “Efeito da utilização de **prolina** na **tolerância ao estresse hídrico** na cultura de **soja**” (Tabelas 1 e 2).

**Tabela 1. Quantificação das palavras-chave associadas ao título desta Dissertação nos portais de pesquisa ‘Google acadêmico’ e ‘Scielo’ utilizando diferentes palavras-chave na língua portuguesa em 17 de outubro de 2022.**

<b>Palavra-chave</b>	<b>Quantidade</b>
<b>Google acadêmico</b>	
Prolina	44.500
“Estresse hídrico”	44.500
“Tolerância ao estresse hídrico”	2.250
Soja	1.250.000
Prolina and “Estresse hídrico”	2.810
Prolina and “Tolerância ao estresse hídrico”	437
Prolina and Soja	8.750
“Estresse hídrico” and Soja	14.200
“Tolerância ao estresse hídrico” and Soja	1.130
Prolina and “Estresse hídrico” and Soja	1.200
Prolina and “Tolerância ao estresse hídrico” and Soja	266
<b>Scielo</b>	
Prolina	233
Estresse hídrico	647
Tolerância ao estresse hídrico	148
Soja	4.938
Prolina and Estresse hídrico	43
Prolina and Tolerância ao estresse hídrico	15
Prolina and Soja	2
Estresse hídrico and Soja	45
Tolerância ao estresse hídrico and Soja	12
Prolina and Estresse hídrico and Soja	1
Prolina and Tolerância ao estresse hídrico and Soja	1

**Tabela 2. Quantificação das palavras-chave associadas ao título desta Dissertação nos portais de pesquisa ‘Google acadêmico’ e ‘SciELO’ utilizando diferentes palavras-chave na língua inglesa em 17 de outubro de 2022.**

Palavra-chave	Quantidade
<b>Google acadêmico</b>	
Proline	1.490.000
“Water stress”	1.710.000
“Tolerance to water stress”	7.710
Soybean	2.820.000
Proline and “Water stress”	60.800
Proline and “Tolerance to water stress”	2.710
Proline and Soybean	102.000
“Water stress” and Soybean	193.000
“Tolerance to water stress” and Soybean	3.160
Proline and “Water stress” and Soybean	33.000
Proline and “Tolerance to water stress” and Soybean	1.520
<b>SciELO</b>	
Proline	357
Water stress	2.509
Tolerance to water stress	459
Soybean	6.172
Proline and water stress	105
Proline and Tolerance to water stress	35
Proline and Soybean	5
Water stress and Soybean	93
Tolerance to water stress and Soybean	23
Proline and Water stress and Soybean	2
Proline and Tolerance to water stress and Soybean	0

## 2.2 A cultura de soja e sua importância

A soja (*Glycine max* L. Merr.) é uma planta pertencente à ordem *Fabales*, família *Fabaceae*, tem como centro de origem o continente asiático, mais precisamente a região da China Antiga (CÂMARA, 2015). A soja vem sendo consumida há mais de cinco mil anos pela população chinesa, sendo a referência mais antiga escrita em 2838 a.C. Ela foi introduzida na Coreia e depois levada ao Japão e por não haver intercâmbios, a soja permaneceu restrita ao oriente por vários anos. Somente com a chegada dos europeus no final do século XV e inícios do século XVI, foi levada para o Ocidente. Após a chegada nas Américas, mais precisamente nos Estados Unidos, no ano de 1880, seu cultivo foi recomendado, todavia, somente a partir de 1930 ocorreu sua expansão como grande produtora de grãos (CÂMARA, 2015).

No Brasil, a primeira referência encontrada foi no ano de 1882, ao qual sabe-se que a soja foi introduzida por Gustavo D’Utra, no estado da Bahia. A partir de então, diversos estudos foram realizados para o estabelecimento da cultura. Hoje a soja é cultivada em todo o

território nacional, desde baixas a altas altitudes. Destaca-se ainda, que em algumas localidades a produtividade encontrada supera a obtida pela soja norte-americana (CÂMARA, 2015).

A soja pode apresentar hábito de crescimento determinado ou indeterminado de acordo com cada cultivar. O sistema radicular é composto por uma raiz principal que pode ultrapassar um metro de profundidade e com um grande volume de raízes secundárias (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2018). Nas raízes são localizados vários nódulos, resultantes da ação de bactérias, as quais, fazem captação do nitrogênio atmosférico e conversão para uma forma que a planta consiga absorver (amônia  $\text{NH}_3$ ). As cultivares brasileiras atuais apresentam raízes pouco profundas, ficando a zona efetiva do sistema radicular ao redor de 40 a 50 cm, o caule é reto, herbáceo, ramificado e coberto por pilosidades (FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009). É uma espécie autógama, ou seja, faz autofecundação, apresenta flores completas protegidas pela corola. As sementes são protegidas por uma vagem pilosa levemente arqueada medindo cerca de 2 a 7 centímetros (NUNES, 2016; GAVA, 2014).

Para as condições climáticas do Brasil, o ciclo fenológico de soja é subdividido em duas fases distintas; os estádios vegetativos, nominados pela letra “V”. A primeira subdivisão corresponde ao VE, representando a emergência da plântula, a segunda ao “VC” representando o momento da abertura total dos cotilédones. As demais subdivisões são enumeradas em  $V_1, V_2, V_3... V_n$ , sendo que o ‘n’ corresponde ao número de nós acima do nó cotiledonar que apresentam folhas completamente desenvolvidas (Tabela 3). Já os estádios reprodutivos são representados pela letra “R” e enumerados de 1 a 8 descrevendo com detalhes os períodos de florescimento até a maturação plena, conforme é ilustrado na Tabela 3 (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2007). O ciclo dos cultivares comercializados no Brasil varia entre 100 (cultivares precoces) e 160 (cultivares tardias) dias, possuindo média em torno de 120 dias (NUNES, 2016).

**Tabela 3. Estádios fenológicos da cultura soja.**

Período	Estádio	Descrição
Vegetativo	VE	Cotilédones acima da superfície do solo
	VC	Cotilédones abertos completamente
	V <sub>1</sub>	Folhas unifolioladas completamente desenvolvidas
	V <sub>2</sub>	Primeira folha trifoliolada completamente desenvolvida
	V <sub>3</sub>	Segunda folha trifoliolada completamente desenvolvida
	V <sub>n</sub>	Enésima folha trifoliolada completamente desenvolvida
Reprodutivo	R <sub>1</sub>	Início do florescimento
	R <sub>2</sub>	Florescimento pleno
	R <sub>3</sub>	Início da formação de vagem
	R <sub>4</sub>	Vagem completamente desenvolvida
	R <sub>5</sub>	Início do enchimento do grão
	R <sub>6</sub>	Grãos cheios ou completos
	R <sub>7</sub>	Início da maturação
	R <sub>8</sub>	Maturação plena - 95% das vagens
	R <sub>9</sub>	Maturidade fisiológica

Fonte: Adaptado de Farias, Neumaier e Nepomuceno (2009).

Para a regulação do desenvolvimento das plantas vários fatores são considerados, dentre eles o fotoperíodo é o regulador mais importante pois, influencia na indução do florescimento (CHANG, 1974). O fotoperíodo é definido como o período entre o amanhecer (crepúsculo matutino) e o pôr do sol (crepúsculo vespertino) e de acordo com esse parâmetro as plantas podem ser classificadas em plantas de dia curto, neutro ou de dia longo (BERGAMASCHI, 2007; CHANG, 1974). Segundo os mesmos autores, a soja se enquadra no grupo das plantas de dia curto, ou seja, ela floresce em fotoperíodos menores do que um máximo crítico. SETIYONO et. al (2007) explicam que o fotoperíodo crítico em teoria é aquele que acima dele a planta não floresce e tem o ciclo de desenvolvimento de maior duração.

A produção mundial de soja foi de 342,09 milhões de toneladas na safra 2017/18 seguido de um aumento de 4,62% na safra seguinte, com produtividade de 2,85 toneladas por hectare (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2020).

Na safra 2021/22 a produção mundial de soja foi de 353,24 milhões de toneladas, o que representa uma queda de 4,12% em relação à safra anterior. Em contrapartida, para a

safra 22/23 há projeção para que ocorra a recuperação nos índices produtivos, com estimativa de produção de 389,77 milhões de toneladas. Somente os Estados Unidos e o Brasil representam o equivalente à 70% de toda a produção global de soja, exercendo grande influência sobre os indicativos globais de produção (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2022).

Na safra 2019/20, o Brasil se consolidou como o maior produtor global de soja com uma produção de aproximadamente 124,8 milhões de toneladas (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2021), na safra 2021/22 colheu o equivalente a 125,55 milhões de toneladas. Por consequência do fenômeno ‘La Niña’ durante a safra 21/22 promoveu veranicos prolongados sobre as principais regiões produtoras da *commodity*, gerando uma queda de produção de 9,9% da safra anterior (2020/2021).

O Mato Grosso é o estado da federação com maior representatividade sobre a produção nacional desse grão, responsável por uma fração superior a 32% de toda a produção, ou o equivalente a 40,8 milhões de toneladas (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2022). Seguido dos estados Goiás e Paraná com uma produção de aproximadamente 16 e 12,2 milhões de toneladas, respectivamente.

### **2.3 Cultivo de soja, elementos do clima e estresse**

Na cultura de soja, a água participa da maioria dos processos fisiológicos e bioquímicos, além de ser quase 90% da massa da planta. É um solvente que tem papel fundamental no transporte de gases e minerais nas plantas, além de sua importância como regulador térmico agindo no resfriamento e na manutenção e distribuição do calor. De acordo com Câmara (2009), para cada quilograma de matéria seca produzida através da fotossíntese, a soja necessita transpirar cerca de 580 kg de água.

De acordo com Carvalho et al. (2013), a necessidade total por água na soja varia entre 450 mm e 800 mm bem distribuídos em todo o ciclo. Com o desenvolvimento, a necessidade de água também vai aumentando, atingindo a máxima quantidade exigida no período de floração e enchimento de grãos, necessitando de 7 a 8 mm por dia, representando um total de 120 a 300 mm. Após este pico, a necessidade hídrica vai reduzindo até atingir a maturação efetiva (FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009; EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2011).

Em campo, as culturas estão sujeitas à exposição de diversos fatores adversos incluindo seca, baixa ou alta temperatura e salinidade, as quais afetam drasticamente o crescimento e produtividade das culturas (QASEEM et al., 2018; HE; HE; DING, 2018).

Dentre as variáveis meteorológicas que mais influenciam o crescimento e a produtividade de soja, a temperatura e a disponibilidade hídrica se mostram muito relevantes pela dificuldade na precisão das condições climáticas adversas que ocorrem nas lavouras, ameaçando o crescimento da produtividade e expansão das culturas mundialmente (VALDÉS-LÓPEZ et al., 2016; SHAHEEN et al., 2016). A temperatura do ar é um dos principais fatores reguladores do consumo de água e da evapotranspiração das culturas, afetando o crescimento, desenvolvimento e produção de biomassa (ANAPALLI et al., 2018).

A floração de soja somente é induzida quando as temperaturas estiverem acima de 13°C. Em contrapartida, altas temperaturas, aceleram o período reprodutivo (florescimento), acarretando redução na altura das plantas, e no período de maturação dos grãos, afetando de forma negativa a qualidade dos grãos e sementes (FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009).

Segundo Sehgal et al. (2018), temperaturas altas causam impactos negativos para a cultura de soja tanto em fase vegetativa quanto reprodutiva, sendo mais evidenciados na segunda fase pois, o pegamento de flores e vagens e enchimento de grãos possuem intervalos de temperaturas ótimas menores, comparados aos intervalos da fase vegetativa.

Temperaturas elevadas durante o período de enchimento de grãos podem levar à uma rápida mobilização de fotoassimilados e diminuição do tempo disponível para o acúmulo desses compostos nas sementes (BOOTE et al., 2005; SEHGAL et al., 2018; DJANAGUIRAMAN et al., 2020). Pode ocorrer ainda, a senescência precoce das folhas e conseqüentemente uma diminuição na concentração da clorofila (OUGHAM; THOMAS; ARCHETTI, 2008), além de uma redução na taxa líquida de assimilação de CO<sub>2</sub> (RUIZ-VERA et al., 2013; MATHUR; AGRAWAL; JAJOO, 2014; DJANAGUIRAMAN et al., 2018), entre outros efeitos negativos.

A disponibilidade de água no solo é inversamente proporcional à acréscimos na temperatura, o *deficit* de água exige da planta uma maior capacidade de reduzir perdas desse elemento para manter sua sobrevivência. Como primeiro recurso de proteção utilizado pela planta sob essas condições, está o fechamento estomático, que evita comprometimento bioquímico da fotossíntese pela redução na fixação de CO<sub>2</sub> no ciclo de Calvin (SIDDIQUI et al., 2015).

O fechamento dos estômatos reduz a perda de água pela planta, todavia também aumenta a temperatura da folha o que pode levar ao estresse térmico (TARDIEU, 2013).

Em condições de estresse térmico, há a redução na solubilidade do CO<sub>2</sub>, o que promove a fixação de O<sub>2</sub> e a fotorrespiração (SICHER, 2015). Em adição, a temperatura promove a desestabilidade da cadeia transportadora de elétrons dada maior permeabilidade das membranas dos tilacóides, que ainda é responsável por comprometer o gradiente de íons necessários para a fotossíntese (KALAJI et al., 2016; BOKSZCZANIN et al., 2013). Esse desbalanço energético ocasiona aumento na produção de compostos oxidantes que compromete lipídeos e proteínas das membranas (NIU; XIANG, 2018). Em plantas de soja expostas a três dias de estresse térmico (alta temperatura) houve reduções na taxa fotossintética, na concentração de carboidratos e, ainda, na massa seca das folhas (SIEBERS et al., 2015). Já segundo Mundstock e Thomas (2005), a precocidade do período de florescimento não permite que a planta produza material vegetativo (número de ramos e folhas) o suficiente, refletindo diretamente na redução da quantidade de nós e, conseqüentemente, no número de flores que produziram os grãos.

Em trabalhos realizados durante 15 safras em Londrina-PR, a Embrapa avaliou diversas condições de disponibilidade hídrica em cultivares de soja. Foi possível observar que os maiores rendimentos de grãos de soja encontrados foram com 650 mm a 700 mm de água, bem distribuídos em todo o ciclo água (FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009).

Farias, Neumaier e Nepomuceno (2009) mostram que os períodos mais sensíveis à falta de água são a germinação/emergência e floração/enchimento de grãos, todavia segundo Sentelhas et al. (2015), durante as fases de florescimento e enchimento dos grãos, é onde a cultura possui a sensibilidade mais elevada.

Durante a emergência das plantas, tanto a falta quanto o excesso de água são considerados um problema, sendo a mais prejudicial à cultura, afetando o estabelecimento de soja, além da uniformidade da população de plantas. O conteúdo de água no solo ideal no período de germinação e emergência não deve ultrapassar 85% do total máximo disponível, nem ser inferior a 50%. Com isso, a quantidade de água atenderá o requerimento para uma germinação eficiente, partindo do pressuposto que a semente de soja necessita absorver no mínimo 50% de sua massa em água (FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009).

O *deficit* de água no período reprodutivo pode gerar um distúrbio conhecido como retenção foliar. A falta de água leva ao abortamento das flores e vagens que reduz a demanda por assimilados, podendo ser agravado pelo excesso de chuvas no período de maturação,

mesmo em plantas com carga de vagens satisfatória. Com isso, devido à alta umidade de folhas e caules junto aos grãos, a colheita mecanizada, o armazenamento e a comercialização são dificultados (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). Ainda pode causar fechamento estomático e enrolamento das folhas, ocasionando queda prematura das folhas, flores e vagens (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2010).

Mohamed e Latif (2017) observaram reduções no comprimento, na massa seca da parte aérea e da raiz, nos teores de pigmentos fotossintéticos e no teor relativo de água, quando as plantas foram expostas ao estresse hídrico.

Na fase de enchimento de grãos, a associação da alta temperatura com baixa disponibilidade hídrica pode provocar distúrbios na planta resultando em menores produtividades, além de afetar consideravelmente a germinação, vigor e a qualidade. Na produção de sementes este fator se torna preocupação ainda maior, pois, estas condições resultam em sementes menores, menos densas, verdes ou imaturas, deformadas ou enrugadas e, dependendo do cultivar, o número e intensidade dessas ocorrências serão, mais ou menos, acentuados (NEUMAIER et al., 2000; CUNHA et al., 2001; PESKE; BARROS, 2003).

Peske e Barros (2003) afirmam que, na cultura de soja no estágio de enchimento de grãos, um período curto de seca associado a altas temperaturas, as sementes produzidas serão de tamanhos menores e apresentarão problemas na germinação.

Segundo Neumaier et al. (2000), durante a fase de enchimento de grãos, a ocorrência de altas temperaturas (valores acima de 30°C) associadas a períodos longos de seca (deficit hídrico) pode causar o enrugamento, menores densidades (mais leves), menor rendimento e menor qualidade dos grãos.

Como exemplo, segundo os mesmos autores, se a planta for submetida a temperaturas altas (32°C/28°C - dia/noite), poderá haver redução de até 28% na germinação, 24 mg planta<sup>-1</sup> de matéria seca das sementes e em 26% o número de sementes descoloridas (qualidade visual), sendo que estes mesmos parâmetros são agravados quando associados a deficiência hídrica, conforme foi descrito acima.

França Neto et al. (1993) afirmam que, essa associação, de altas temperaturas com períodos longos de deficit hídrico reduz drasticamente a germinação, vigor, viabilidade, índice de emergência de plântulas, quantidade de óleo nas sementes, aumenta o aparecimento de podridão, causado pelo *Phomopsis* spp., aumento dos índices de ácidos graxos livres e da acidez do óleo e, ainda, pode favorecer o aumento da retenção de clorofila, conhecido como sementes esverdeadas (FRANÇA NETO et al., 2016; FRANÇA NETO; PÁDUA; KRZYZANOWSKI, 2012).

No período de maturação, a ocorrência de temperaturas muito altas associadas ou não com alta umidade afetam negativamente a qualidade (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2010; FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009).

O estresse hídrico pode provocar o aparecimento de outros problemas, como o surgimento da síndrome conhecida como haste verde, caracterizada pelo mantimento das hastes de soja verdes, mesmo posteriormente à maturidade fisiológica das sementes e como foi comentado, causa ainda, a retenção foliar, cujas folhas são mantidas verdes por um período maior, mesmo após maturação (SILVA; CANTERI; SILVA, 2013; EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2003).

Em um experimento realizado para avaliação do crescimento e da produtividade de soja submetida ao déficit hídrico durante o ciclo total, Simeão (2015) observou queda de 62% na produtividade da cultura quando a falta de água atingiu a fase de floração e enchimento de grãos. Já Siebers et al. (2015) registraram perdas de até 54% na produtividade, devido às condições de estresses impostas por um período de veranico.

Para se adaptarem às condições de estresses (seca e as altas temperaturas), as plantas passam por ajustes fisiológicos e morfológicos. Por exemplo, para terem boa manutenção do turgor celular e no crescimento, as plantas se adaptaram e responderam com melhorias na eficiência do uso da água (produção de matéria seca pela quantidade de água transpirada) e no ajustamento osmótico (BLUM, 2016; WEI et al., 2017). As plantas que possuem maior eficiência no uso da água apresentam fechamento parcial dos estômatos onde a concentração intracelular de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é suficiente para a produção da máxima taxa fotossintética. Ao mesmo tempo há redução significativa da perda de água pela transpiração (LI et al., 2017).

A transpiração por meio dos estômatos pode desempenhar também papel importante no processo de refrigeração das mesmas, se mostrando como alternativa para tolerar ambientes quentes e secos (ZHOU et al., 2015; FELLER, 2016).

## **2.4 Efeitos das mudanças climáticas**

A agricultura é uma atividade muito influenciada pelo clima. Sabe-se que o efeito estufa é um processo natural e fundamental para a manutenção da vida na superfície terrestre. Todavia, devido, principalmente, às atividades antrópicas como desmatamento, alterações do uso do solo, uso de combustíveis fósseis, uso de fertilizantes, atividades agrícolas, indústrias

entre outros, este processo está desencadeando alta variação na temperatura diária, além de situações extremas (LESSIN; GHINI, 2009; HEINEMANN et al., 2006). O fator que mais influencia o aquecimento global é o aumento nas concentrações dos gases do efeito estufa, como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ozônio ( $\text{O}_3$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e metano ( $\text{CH}_4$ ) (LESSIN; GHINI, 2009; HEINEMANN et al., 2006).

O dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), além de ser o principal gás atuante no efeito estufa (crescimento de 40% na sua concentração na atmosfera desde a era pré-industrial) e, conseqüentemente, contribuinte do aumento da temperatura da terra pode causar impactos na atividade fotossintética. O aumento na sua concentração pode aumentar de forma positiva a produção de biomassa (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Em contrapartida, se associado ao aumento da temperatura do ar, afetará o crescimento e o rendimento da cultura de soja, bem como na redução do ciclo de desenvolvimento da cultura, podendo anular os efeitos positivos do  $\text{CO}_2$  (TAIZ; ZEIGER, 2013). O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas estima que até o final deste século, a concentração de dióxido de carbono ultrapassará 550 ppm em um cenário otimista, podendo atingir 1000 ppm em um mais pessimista (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007).

As condições climáticas sofrerão mudanças nos próximos anos. Os autores estimam que para a região do cerrado brasileiro, até o ano de 2040 haverá aumento de  $1^\circ\text{C}$  na temperatura média do ar associado à redução das chuvas entre 10 e 20%. Até o ano de 2070 as elevações médias na temperatura serão entre  $3^\circ\text{C}$  e  $3,5^\circ\text{C}$  com redução nas precipitações entre 20% e 35%. Já para o final do século, entre os anos de 2071 e 2100, o aumento da temperatura atingirá valores entre  $5^\circ\text{C}$  e  $5,5^\circ\text{C}$ , além da redução nos índices pluviométricos críticos, atingindo valores entre 35% e 45%. Essas alterações térmicas e hídricas nos próximos anos implicam no zoneamento agrícola de soja em diversas localidades, visto que a produtividade está diretamente relacionada à temperatura e disponibilidade hídrica (PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 2014).

De acordo com Pinto e Assad (2008), a área favorável no Brasil no ano de 2008 para a semeadura de soja, na categoria sem risco era aproximadamente 3,4 milhões de quilômetros quadrados. Em uma perspectiva de aumento da temperatura do ar em  $3^\circ\text{C}$ , diversas regiões como, São Paulo, Rio Grande do Sul, leste de Goiás, Tocantins, sul do Maranhão, Piauí e o estado de Minas Gerais, encontrarão problemas de risco no cultivo de soja. Em um cenário mais crítico, com aumento de  $5,8^\circ\text{C}$  na temperatura global, haverá redução de até 70% na área

com baixo risco, refletindo na redução de 2,2 milhões de quilômetros quadrados aptos para a semeadura.

Os mesmos autores observaram nas projeções realizadas que, com o aumento da temperatura, a disponibilidade de água sofrerá mudanças, em função do aumento da taxa de evapotranspiração. As perspectivas para o ano de 2100 nas regiões de Sete Lagoas e Montes Claros, ambas localizadas no estado de Minas Gerais, como exemplo, é que haja alteração drástica no balanço hídrico, chegando na redução para apenas 5 meses com excedente de água no solo, ao qual causará grande alteração no calendário agrícola.

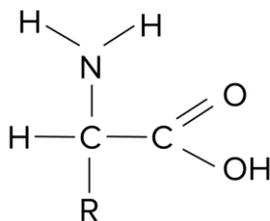
Comprovando estas observações, Streck e Alberto (2006) através de estudo no município de Santa Maria no estado do Rio Grande do Sul observaram que o aumento de 6°C na temperatura é capaz de reduzir o rendimento da cultura expressivamente. Neste mesmo estudo, o melhor cenário para a produção da cultura foi através do aumento de CO<sub>2</sub> associado ao aumento da precipitação, sem variações da temperatura do ar.

Desse modo, é possível observar que qualquer alteração no clima pode afetar não somente na produtividade de uma cultura, mas o zoneamento agrícola de uma região.

## **2.5 Aminoácidos nas plantas**

Os aminoácidos são moléculas orgânicas que atuam em diversas etapas do metabolismo da planta, como na síntese de proteínas e hormônios vegetais, além de apresentarem 60 a 70% da matéria seca em células vegetais vivas. Na produção de hormônios vegetais os aminoácidos exercem a função de compostos intermediários, com potencial de promover resistência a estresses abióticos como o estresse térmico e hídrico, induzindo maior tolerância ao ataque de pragas e doenças, e possuem efeito complexante em nutrientes e agroquímicos (CASTRO; CARVALHO, 2014).

Os aminoácidos são formados por um carbono central, frequentemente assimétrico, ligado a um átomo de hidrogênio e a dois grupamentos: amina (NH<sub>2</sub>) e carboxila (COOH), conforme visto na Figura 1. Apresentam um radical que promove a diferenciação entre eles (TAIZ; ZEIGER, 2013; CASTRO; CARVALHO, 2014).



**Figura 1. Estrutura geral de um aminoácido. Fonte: Teixeira (2016). Legenda: R – Radical orgânico; H – Hidrogênio; N – Nitrogênio; C – Carbono; O – Oxigênio.**

Podem ser encontrados sob três formas: Os aminoácidos denominados livres encontram-se dissolvidos na solução do solo, disponíveis para absorção por meio das raízes; os aminoácidos permutáveis são aqueles que se encontram ligados às partículas de argila ou matéria orgânica do solo e a terceira forma, representa os aminoácidos que são encontrados nas moléculas de proteína, numa forma pouco disponível às plantas, capazes de reabastecer o estoque de aminoácidos do solo (SCHULTEN; SCHNITZER, 1997).

Com uso em ascensão na agricultura, inúmeras empresas estão expandindo seu portfólio de produtos à base de aminoácidos, a fim de atender as diversas culturas no Brasil e no mundo (CASTRO; CARVALHO, 2014).

## 2.6 Prolina e estresse

Diante de condições estressantes, as plantas são capazes de recorrer à mecanismos de ajustes fisiológicos, metabólicos e morfológicos que reduzem os efeitos negativos do *deficit* hídrico e temperaturas elevadas. Haworth et al. (2018) evidenciam o controle estomático, a eficiência do uso de água (EUA) e o ajustamento estomático como ajustes importantes na manutenção do turgor celular e crescimento das plantas (BLUM, 2016).

Como resposta à exposição a diversos tipos de estresses ambientais, a planta produz espécies reativas de oxigênio (ERO), as quais ocasionam estresse oxidativo. Diante da produção de espécies reativas de oxigênio (ERO), a defesa do metabolismo está associada a ativação de mecanismos enzimáticos que constituem um sistema antioxidante. Esse mecanismo utiliza enzimas importantes na rota de desintoxicação de ERO, tais como a dismutase do superóxido (SOD), a catalase (CAT), a peroxidase do ascorbato (APX) e as peroxidases (POD) (HASANUZZAMAN et al., 2013). Estudos evidenciam a relevância desse sistema antioxidante na capacidade da planta em tolerar estresses térmico e hídrico (KOFFLER et al., 2014; NAHAR et al., 2015).

Dallagnol et al. (2011) enfatizam que, com a elevação na concentração de oxigênios reativos, há maior dano celular e extravasamento de eletrólitos devido á interação com o processo de peroxidação lipídica.

Zhao et al. (2014) observaram, em estudo com capim-de-pé-de-galinha, sob condições de alta temperatura (38°C), maior expressão das enzimas SOD, CAT e POD, conferindo tolerância ao calor. Em paralelo, Mirzai, Moeini e Ghanati (2013), utilizando duas variedades de canola expostas à deficiência hídrica, verificaram que o cultivar tolerante possuía maior atividade das enzimas SOD, POD, CAT e APX.

Os mecanismos que atuam sobre a redução da perda de água em plantas contemplam a atuação do ácido abscísico (ABA) no aumento do controle osmótico e o ajuste osmótico pelo aumento na concentração de solutos como, açúcares, glicerol, prolina, glicina betaína, açúcares álcoois, dentre outros (HATZIG et al., 2014; HARSH et al., 2016), que atuam no controle osmótico, desintoxicando as células que possuem concentrações nocivas de oxigênios reativos, garantindo a integridade da membrana e a estabilidade na produção de enzimas e proteínas. Dentre os compostos acumulados capazes de auxiliar nesse processo, se encontra a prolina (HAYAT et al., 2012), que pode dobrar sua concentração dentro do metabolismo da planta (DELATORRE-HERRERA et al., 2010; SILVENTE et al., 2012).

Em espécies vegetais, a prolina é sintetizada nos tecidos foliares por duas rotas, a via do glutamato e da ornitina. Por esse motivo, as concentrações desse aminoácido nas folhas são mais pronunciadas do que nas raízes ou frutos (HAYAT et al., 2012; MWENYE et al., 2016).

Sob condições de estresse, a prolina é produzida em maior quantidade por meio da via do glutamato, promovendo seu acúmulo no vacúolo ou citosol. Dentro da célula, esse aminoácido atua como um osmólito, contrabalanceando respostas fisiológicas da planta aos estresses, que incluem a eliminação das espécies reativas de oxigênio. Além disso, a prolina contribui com a estabilidade de estruturas subcelulares, como membranas e proteínas (HAYAT et al., 2012; MWENYE et al., 2016; JALEEL et al., 2007).

O aumento das concentrações intracelulares de prolina refletem o nível de estresse que as plantas estão sendo submetidas, pois esse aminoácido opera como osmorregulador, antioxidante e protetor da atividade enzimática. Dentre suas diversas funções destacam-se: (i) chaperonas moleculares os quais podem atuar na proteção da integridade das proteínas. Esta função inclui a prevenção da agregação e estabilização da M<sub>4</sub> lactato desidrogenase em temperaturas extremas, bem como a proteção da enzima nitrato redutase em situações

estressantes devido à presença de metais pesados e em situações de estresse osmótico (WELTMEIER et al., 2006; SHARMA; DUBEY, 2005). Atua ainda na estabilização de ribonucleases e proteases em altos níveis de arsênio (MISHRA; DUBEY, 2006; SMIRNOFF; CUMBES, 1989; MATYSIK et al., 2002), e (ii) inúmeros estudos vêm mostrando a importância da atividade antioxidante da prolina, indicando assim como um potente agente com atividade “scavenging” (desintoxicante) (SMIRNOFF; CUMBES, 1989; MATYSIK et al., 2002).

Segundo Verbruggen e Hermans (2008), a concentração de prolina nos organismos podem aumentar em até 100 vezes durante períodos de estresse. Corroborando com os resultados, Hossain, Lam e Zhang (2015), em estudo com diferentes genótipos de soja, observaram um aumento significativo da prolina nos tecidos foliares e raízes, além de maior comprimento de raiz no genótipo tolerante.

Haque et al. (1971), em pesquisa com a cultura do arroz, averiguaram a capacidade de incorporação de alguns aminoácidos nos diferentes estádios de desenvolvimento da planta. No estágio de plântula, a prolina é o terceiro aminoácido mais incorporado, subindo para a segunda e primeira colocação nos estádios de espiga jovem e reprodutivo, respectivamente, sugerindo que, estádios mais avançados, a planta exige maiores concentrações de prolina frente aos demais aminoácidos.

A prolina possui papel muito importante na expressão de respostas a condições de estresse. O acúmulo natural desse componente é uma característica hereditária, permitindo a melhoristas analisarem o teor de acúmulo desse aminoácido nos tecidos para a triagem de linhagens que possuam maior capacidade de tolerar condições de estresses abióticos (MWENYE et al., 2016).

O acúmulo de prolina é apontado como uma resposta para inúmeros tipos de estresses, como exemplo o estresse salino, térmico e hídrico (SZABADOS; SAVOURÉ, 2010). Esse efeito foi observado em pesquisa desenvolvida por Arteaga et al. (2020), os quais constataram que a prolina é um indicador de tolerância à salinidade e estresse hídrico para a cultura do feijão.

Em pesquisa com a aplicação de L-prolina na cultura do tomate quando submetida a condições de estresse térmico, plantas que receberam tratamentos apresentaram incrementos na produtividade total, produtividade comercial e na produção de frutos classificados como grandes (TONHATI, 2018). Nessa mesma cultura, Kahlaoui et al. (2015) obtiveram resultados que corroboram com o observado, no qual foi encontrado maior concentração de prolina no cultivar tolerante a condição de estresse salino em comparação com a não tolerante.

Em pesquisa sobre a influência do *deficit* hídrico em diferentes cultivares de soja, Masoumi et al. (2011) verificaram que, sob condições mais estressantes, o cultivar com maior tolerância a seca apresentou maior produção de grãos e óleo. Nesse mesmo estudo, todos os cultivares apresentaram acréscimos nos teores de ABA e prolina conforme as plantas eram expostas a condições mais severas de estresse. O cultivar que apresentou maiores índices produtivos no tratamento mais estressante, também foi aquele que apresentou os teores de ABA e prolina mais elevados, o que incrementou a capacidade da planta em amenizar as injúrias oxidativas, mantendo seus índices produtivos mais próximo ao potencial nas condições sem estresse.

Resultados semelhantes foram obtidos por Moussa e Abdel-Aziz (2008) que, em estudos com dois cultivares de milho sob condições de estresse hídrico, observaram incrementos nos teores de prolina à medida que as plantas eram expostas a condições estressantes. Entre os cultivares utilizados no experimento, aquele que possuía tolerância à seca apresentou maiores teores de prolina, sustentando os dados observados por Masoumi et al. (2011).

Teixeira et al. (2019) estudaram o efeito da aplicação de aminoácidos na redução do estresse hídrico em plantas de soja. Em seu experimento, plantas submetidas a tratamento de semente e aplicação foliar de prolina, em regimes de ausência de estresse hídrico à estresse moderado, apresentaram maior matéria seca da raiz. Ambos os métodos de aplicação de prolina promoveram maior nodulação nas plantas com deficiência hídrica leve. Sob a mesma condição hídrica, plantas tratadas com aplicação foliar apresentaram maior atividade da enzima nitrato redutase. Contudo, em plantas submetidas ao estresse hídrico severo as aplicações de aminoácidos não promoveram alterações nas variáveis analisadas.

Todavia, a produção exagerada de prolina é prejudicial às plantas, pois ela consome de 0,4 a 0,6% do nitrogênio total das folhas e dessa forma ela pode consumir parte do nitrogênio que poderia ser utilizado para as atividades de crescimento. Ainda, a presença em altas concentrações desses aminoácidos pode ter efeitos tóxicos e atuar como inibidor do crescimento (ERNST; NELISSEN; BOOKUM, 2000).



### **3 MATERIAIS E MÉTODO**

#### **3.1 Ambientes e locais**

Este estudo foi realizado por intermédio de 2 experimentos.

##### **3.1.1 Experimento I: Capinópolis, MG**

O Experimento I foi instalado em ambiente controlado (casa-de-vegetação), localizada no município de Capinópolis (MG), situado a 18° 40' 55" de latitude sul, 49° 34' 12" de longitude oeste e altitude média de 530 metros.

##### **3.1.2 Experimento II: Sorriso, MT**

O Experimento II instalado em condições de campo, localizado no município de Sorriso (MT), situado a 12° 32' 42" de latitude sul, 55° 42' 39" de longitude oeste e altitude média de 365 metros.

#### **3.2 Clima**

##### **3.2.1 Experimento I: Capinópolis, MG**

Em Capinópolis (MG), o clima apresenta inverno seco e verão quente e úmido (**Aw**, segundo a classificação de Köppen) com temperatura média de 25°C e precipitação média anual de aproximadamente 1350 mm.

##### **3.2.2 Experimento II: Sorriso, MT**

Em Sorriso (MT), o clima é do tipo Tropical Monsônico com inverno seco (**Am**, segundo a classificação de Köppen), com precipitação média anual em torno de 2000-2500 mm (período de chuvas: setembro a maio), sendo a temperatura média anual igual a 24-26°C.

#### **3.3 Substrato e solo**

##### **3.3.1 Experimento I: Substrato**

A terra utilizada como substrato para o crescimento das plantas foi coletada em um Latossolo Vermelho, textura franco-argilo-arenosa (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2013a,b), localizada no município de Capinópolis MG, que

foi submetido a análise química para as correções de pH e obtenção das concentrações de nutrientes disponíveis para o cálculo da adubação de semeadura e cobertura.

Para a adubação do solo, foi utilizado o fertilizante mineral misto com a mistura de grânulos 7-28-16 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O) da empresa Yara (lote 0002098157 e validade para o dia 6 de novembro de 2022) na quantidade equivalente a 72,0 gramas por vaso, aproximadamente.

Para a homogeneização do solo e mistura do formulado foi utilizado uma betoneira para obras com capacidade de 400 litros, cujo modelo é a BM400 da empresa MetalPama. Inicialmente o solo coletado foi distribuído em quatro partes iguais e de cada parte foi adicionado na betoneira 160 litros de solo, onde foi homogeneizado por 30 minutos. Ao final da homogeneização total do solo foi construído outras novas 4 partes de substrato, conforme realizado no primeiro processo. Desde substrato foi realizado a mistura entre as partes com o auxílio da betoneira, todavia, neste momento, foi adicionado o adubo na quantidade correta para cada vaso e misturado por 30 minutos.

Após a homogeneização completa, foi adicionado em cada vaso, a quantidade de substrato equivalente a capacidade de 85% do seu total (aproximadamente 10,2 litros). As especificações do substrato (solo + correção de adubação) estão expostas nas Tabelas 4 e 5.

**Tabela 4. Caracterização química de um Latossolo Vermelho amostrado na profundidade de 0 a 0,2 m. Capinópolis, MG, 2021.**

pH H <sub>2</sub> O (1:2,5)	P mg dm <sup>-3</sup>	K mg dm <sup>-3</sup>	cmol dm <sup>-3</sup>				T	V %	MO dag kg <sup>-1</sup>	
			Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	H+Al				
5,7	15,2	342	0,0	2,32	0,91	2,24	4,1	8,1	6,34	2,7

P e K disponíveis: Extraídos com HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol L<sup>-1</sup>; acidez trocável Al<sup>3+</sup>; Ca<sup>2+</sup>; Mg<sup>2+</sup>: Método KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; acidez potencial (H +Al): Solução Tampão SMP a pH 7,5; SB (soma de bases): SB = Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup>; T (capacidade de troca catiônica a pH 7,0): T = SB + (H + Al); V (saturação por bases): V(%) = (100 x SB/ T); pH em água (1:2,5).

**Tabela 5. Composição granulométrica de um Latossolo Vermelho amostrado na profundidade de 0,0 a 0,2 m. Capinópolis, MG, 2021.**

Granulometria (g kg <sup>-1</sup> )		
Areia	Silte	Argila
300	100	600

### 3.3.2 Experimento II: Solo

Em Sorriso (MT), o solo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, textura argilosa, média e arenosa, relevo plano a suave ondulado, tendo como vegetação original a floresta tropical e cerrado e mineralogia caulinitica-gibbsitica.

Foi realizada a coleta de amostras de solo da área onde o experimento foi instalado e enviada ao laboratório para a realização da análise química conforme exposta nas Tabelas 6 e 7. Os resultados foram utilizados como base para a determinação da correção do solo e adubações de semeadura e cobertura.

**Tabela 6. Caracterização química de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (LVd) amostrado na profundidade de 0 a 0,2 m. Sorriso, MT, 2021.**

pH H <sub>2</sub> O (1:2,5)	P mg dm <sup>-3</sup>	K mg dm <sup>-3</sup>	Al <sup>3+</sup> cmol dm <sup>-3</sup>	Ca <sup>2+</sup> cmol dm <sup>-3</sup>	Mg <sup>2+</sup> cmol dm <sup>-3</sup>	H+Al cmol dm <sup>-3</sup>	SB cmol dm <sup>-3</sup>	T cmol dm <sup>-3</sup>	V %	MO dag kg <sup>-1</sup>
5,8	11,6	148,1	0,0	2,33	1,01	4,70	3,7	8,4	44,3	3,17

P e K disponíveis: Extraídos com HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol L<sup>-1</sup>; acidez trocável Al<sup>3+</sup>; Ca<sup>2+</sup>; Mg<sup>2+</sup>: Método KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; acidez potencial (H + Al): Solução Tampão SMP a pH 7,5; SB (soma de bases): SB = Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup>; T (capacidade de troca catiônica a pH 7,0): T = SB + (H + Al); V (saturação por bases): V% = (100 x SB/ T); pH em água (1:2,5).

**Tabela 7. Composição granulométrica de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (LVd) amostrado na profundidade de 0 a 0,2 m. Sorriso, MT, 2021.**

Granulometria (g kg <sup>-1</sup> )		
Areia	Silte	Argila
318	167	515

A adubação de base/semeadura utilizada foi de 215,0kg por hectare do formulado 04-30-10 e adubação de cobertura com 200,0kg por hectare de cloreto de potássio (KCL).

### 3.4 Tratamento de sementes

Tratamento convencional com *Bradyrhizobium* sp. e *Azospirillum* sp., com 3 doses e 1 dose, respectivamente. As sementes foram tratadas quimicamente com fungicida e inseticida pela empresa produtora.

### 3.5 Produtos a serem testados

Os experimentos foram realizados com a utilização de prolina (L-Prolina - 98,93%) da empresa Xinyi (Hong Kong) Industrial Co. Ltd, importado pela empresa Fertilizantes Célere Eireli sediada em Rondonópolis-MT e fornecido pela empresa Agrocere Binova, sediada em Jardinópolis-SP.

As aplicações foliares de **prolina** foram realizadas com pulverizador pressurizado de CO<sub>2</sub>, equipado com barra lateral de fibra de carbono com 6 pontas espaçadas de 0,5 metros. No experimento 1 foi realizada a calibração do pulverizador com vazão por ponta de 0,45 L min<sup>-1</sup> e vazão 166 L ha<sup>-1</sup>. As passadas foram realizadas de forma constante com velocidade média de 3,46 quilômetros por hora. Para o experimento II a vazão utilizada foi de 150 L ha<sup>-1</sup>.

### 3.6 Cultivar

Para todos os experimentos foram cultivadas plantas de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] do Cultivar Brasmax-Extra-IPRO (**Brasmax**), com hábito de crescimento indeterminado, grupo de maturação 7,4 com alto potencial produtivo, resistência a nematoides de cisto, precocidade, porte controlado e resistência a acamamento. As sementes foram fornecidas pela empresa Agrocere Binova e foi utilizada pelo seu potencial comercial.

### 3.7 Controle de plantas daninhas, pragas e doenças

No experimento de campo (Experimento II) foram realizadas três aplicações de fungicidas, sendo elas Mancozeb Nortox (Mancozeb) na dosagem de 2,0 kg ha<sup>-1</sup>, Vessarya (Picoxistobina e Benzovindiflupir) na dosagem de 0,75 litros por hectare e Fusão (Metominostrobina e Tebuconazol) com a dose de 0,58 litros por hectare nos estádios V<sub>8</sub>, R<sub>1</sub> e R<sub>5.1</sub> respectivamente. Para controle das plantas daninhas foi utilizado em pré-dessecação os herbicidas não seletivos, de ação sistêmica Glifosato 720 WG na dosagem de 2,5 kg ha<sup>-1</sup> e o produto Podium EW na dose de 0,3 L ha<sup>-1</sup>, em pós emergência foi realizado a aplicação de 2,0 L ha<sup>-1</sup> de Glifosato 480.

No experimento em casa-de-vegetação (Experimento 1) não foi realizada nenhuma aplicação química, pois, não houve pressão de pragas e doenças. As plantas daninhas foram eliminadas manualmente de acordo com a necessidade.

### 3.8 Delineamento estatístico e parcela experimental

A Tabela 8 apresenta a descrição sucinta dos experimentos, bem como o cultivar de soja e o produto utilizado.

**Tabela 8. Descrição sucinta dos experimentos. Soja. Cultivar: Brasmax-Extra-IPRO.**

Experimento	Local	Ambiente	Produto
I	Capinópolis, MG	Casa-de-vegetação <sup>1</sup>	Prolina
II	Sorriso, MT	Campo	

<sup>1</sup> Imposição do estresse hídrico.

\*Brasmax-Extra-IPRO: hábito de crescimento indeterminado (HCI).

#### 3.8.1 Experimento I

Em casa-de-vegetação, foram semeadas 10 sementes por vaso no dia 24 de novembro de 2021, e após a emergência foi realizado o desbaste, deixando-se 3 plantas. Foram utilizados vasos que possuem capacidade de 12 litros e cada unidade possui aproximadamente 25 cm de altura, 30 cm de diâmetro superior e 22,0 cm de diâmetro inferior. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados (DBC) com dez tratamentos e 4 blocos, totalizando 40 parcelas. A semeadura foi realizada no dia vinte e quatro de novembro de 2021 e colheita no dia quatorze de março de 2022, com ciclo totalizando 110 dias.

#### 3.8.2 Experimento II

Em campo, cada parcela foi composta por seis linhas com 7 metros de comprimento por 0,5 metros nas entrelinhas, totalizando uma área de 21 m<sup>2</sup>. A área útil de cada parcela foi constituída pelas linhas centrais, descartando 1,5 m em cada extremidade da parcela, isolando a possibilidade de deriva cada extremidade. O delineamento experimental foi na forma de blocos ao acaso (DBC) com quatro tratamentos e seis blocos, totalizando 24 parcelas. No Experimento II (à campo) as sementes foram semeadas com o objetivo de atingir uma população de 420.000 plantas ha<sup>-1</sup> (Tabela 8).

A semeadura foi realizada no dia doze de outubro de 2021 e colheita no dia vinte e um de janeiro de 2022, com ciclo totalizando 101 dias. Conforme observado, o ciclo foi menor do que o esperado, pois, neste experimento houve a necessidade da aplicação do dessecante antes do tempo ideal, devido à disponibilidade de equipamentos e mão-de-obra da estação de pesquisa.

### 3.9 Descrição dos tratamentos

#### 3.9.1 Experimento I

O Experimento I, em casa-de-vegetação, foi conduzido em delineamento em blocos casualizados (DBC), sendo os tratamentos constituídos pela aplicação prolina (5  $\mu$ M) nos estádios [V<sub>4</sub>], [R<sub>1</sub>] e [V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub>], utilizando dez tratamentos com quatro repetições (Tabela 9).

**Tabela 9. Imposição do estresse hídrico e descrição dos tratamentos em casa-de-vegetação. Soja.**

Tratamento	Descrição	Dose	Estádio	Estresse
Experimento I				
1	Controle	-	-	100% ETc
2	Controle	-	V <sub>4</sub>	10 dias sem irrigar
3	Controle	-	R <sub>1</sub>	8 dias sem irrigar
4	Controle	-	V <sub>4</sub>	10 dias sem irrigar
		-	R <sub>1</sub>	8 dias sem irrigar
5	Prolina	5 $\mu$ M	V <sub>4</sub>	100% ETc
6	Prolina	5 $\mu$ M	V <sub>4</sub>	10 dias sem irrigar
7	Prolina	5 $\mu$ M	R <sub>1</sub>	100% ETc
8	Prolina	5 $\mu$ M	R <sub>1</sub>	8 dias sem irrigar
9	Prolina	5 $\mu$ M	V <sub>4</sub>	100% ETc
	Prolina	5 $\mu$ M	R <sub>1</sub>	100% ETc
10	Prolina	5 $\mu$ M	V <sub>4</sub>	10 dias sem irrigar
	Prolina	5 $\mu$ M	R <sub>1</sub>	8 dias sem irrigar

Os estádios de aplicação foram escolhidos pelos impactos negativos causados pelo estresse hídrico nestes momentos do ciclo da cultura. Sabe-se que a deficiência hídrica é mais severa entre florescimento e o início do enchimento de grãos, pois, pode acarretar o abortamento de flores e conseqüentemente reduzir o número de vagens por planta (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2011). Todavia, no período

vegetativo, a restrição hídrica pode levar a uma menor taxa de absorção de água e nutrientes, refletindo em uma menor atividade fotossintética, haste menos desenvolvida, redução do crescimento, menor área foliar e conseqüentemente uma menor produtividade (BONATO, 2000; JALEEL et al., 2009a). No presente trabalho foi eleito os estádios R<sub>1</sub> (início do florescimento) e V<sub>4</sub> (terceira folha trifoliolada completamente desenvolvida) para representar estes períodos. Vale ressaltar que são momentos que muitos produtores têm optado para aplicação de produtos foliares que visam tolerância a estresse de plantas.

As aplicações de prolina foram feitas nos mesmos estádios que as plantas foram submetidas ao estresse hídrico (momento mais próximo da condição de estresse) a fim de observar os benefícios da sinalização promovida por este aminoácido (TEIXEIRA et al., 2019).

Foram utilizados quatro tratamentos controles (sem aplicação de Prolina), onde, o primeiro deles (Tratamento 1- sem aplicação de produto e sem estresse) se refere à aplicação de água (irrigação) correspondente a 100% da evapotranspiração potencial (ET<sub>c</sub>) durante todo o ciclo da cultura de soja (sem estresse hídrico), o segundo (Tratamento 2- sem aplicação de produto e com estresse no estádio V<sub>4</sub>), que se refere a não aplicação de água durante 10 dias após o estádio V<sub>4</sub> (com estresse hídrico após o V<sub>4</sub>), o terceiro (Tratamento 3- sem aplicação de produto e com estresse no estádio R<sub>1</sub>), que se refere a não aplicação de água durante 8 dias após o estádio R<sub>1</sub> (com estresse hídrico após o R<sub>1</sub>) e o quarto (Tratamento 4- sem aplicação de produto e com estresse nos estádios V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub>) se refere a não aplicação de água durante 10 dias após os estádios V<sub>4</sub> e 8 dias após o R<sub>1</sub> (com estresse hídrico após os estádios V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub>).

Foram utilizados seis tratamentos com aplicação de prolina (Tratamentos 5 a 10), sendo três sem estresse (Tratamentos 5, 7 e 9) e três com estresse hídrico (Tratamentos 6, 8 e 10).

Em casa-de-vegetação, a reposição da água foi realizada até atingir a capacidade de campo (CC) levando em consideração as leituras obtidas pelos sensores, durante o período antecedente à imposição dos tratamentos.

Como mencionado, nos tratamentos 1, 5, 7, 9 as plantas serão mantidas em condições de irrigação plena, de acordo com a necessidade hídrica.

Nos tratamentos 2, 4, 6, 10 as plantas foram mantidas em condições de irrigação plena, de acordo com a necessidade hídrica (100% da evapotranspiração potencial da cultura - ET<sub>c</sub>) até atingirem o estádio de desenvolvimento V<sub>4</sub>, quando foi realizada a suspensão da irrigação por 10 dias. Segundo Mesquita (2013), esse intervalo caracteriza uma condição de

estresse severo para a cultura de soja. Foi efetuado o mesmo procedimento nos tratamentos 3, 4, 8, as plantas serão mantidas em condições de irrigação plena, de acordo com a necessidade hídrica até atingirem o estágio de desenvolvimento R<sub>1</sub>, todavia neste estágio, devido às condições climáticas do ambiente da casa-de-vegetação, as plantas ficaram em estresse por 8 dias (condição de maior estresse).

Durante a condução do experimento, os vasos foram irrigados diariamente de acordo com a necessidade hídrica, mantendo sempre na capacidade de campo, com exceção aos momentos de estresse hídrico induzido pelos tratamentos.

### 3.9.2 Experimento II

O Experimento II, no campo, foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, constituído pela aplicação de prolina (5 µM) nos estádios [V<sub>4</sub>], [R<sub>1</sub>] e [V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub>], sendo utilizado quatro tratamentos em seis blocos (Tabela 10).

**Tabela 10. Descrição dos tratamentos no campo com a aplicação de prolina em diferentes estádios. Experimento II. Sorriso, MT.**

Tratamento	Descrição	Dose <sup>(a)</sup>		Estádio	Estresse
1	Controle	-	-	-	A campo
2	Prolina	5 µM	150 mg ha <sup>-1</sup>	V <sub>4</sub>	A campo
3	Prolina	5 µM	150 mg ha <sup>-1</sup>	R <sub>1</sub>	A campo
4	Prolina	5 µM	150 mg ha <sup>-1</sup>	V <sub>4</sub>	A campo
	Prolina	5 µM	150 mg ha <sup>-1</sup>	R <sub>1</sub>	

<sup>(a)</sup> Calda: 150 L ha<sup>-1</sup>.

### 3.10 Variáveis analisadas

#### 3.10.1 Massa de matéria seca

Para o experimento em casa-de-vegetação (Experimento I), as determinações de massa de matéria seca de haste e folhas foram realizadas no estágio V<sub>6</sub>. As determinações de massa de matéria seca de haste, folhas e raiz foram realizadas no estágio no estágio R<sub>2</sub>, onde foram utilizadas três plantas por repetição, onde cada órgão da planta foi acondicionado, separadamente, em sacos de papel que foram colocados em estufa com circulação de ar forçada com temperatura de 65°C, até massa constante.

Para o Experimento II, em campo, as determinações de massa de matéria seca da haste e folhas foram realizadas no estágio V<sub>8</sub> e R<sub>5,1</sub>, onde foi utilizada uma planta por repetição.

### 3.10.2 Altura de planta e diâmetro da haste

A altura da planta foi determinada com o auxílio de trena graduada em centímetros, medindo-se a distância compreendida entre o colo e inserção da última folha da planta. Já o diâmetro da haste foi realizado com o auxílio de paquímetro digital medindo a circunferência da haste a aproximadamente 1 cm acima da marcação cotiledonar.

No experimento I, as medições foram realizadas em três plantas por repetição, nos estádios V<sub>6</sub>, V<sub>8</sub>, R<sub>5.1</sub> e no Experimento II, as medições foram realizadas em dez plantas por repetição, nos estádios V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub>.

### 3.10.3 Teor de clorofila

Para determinação do teor de Clorofila Total foi utilizado o medidor portátil de clorofila (clorofilômetro da empresa Falker, modelo ClorofiLOG CFL1030), o qual permite leituras instantâneas de modo não destrutivo.

A análise foi realizada através da medição no folíolo central do terceiro trifólio aberto do ápice para a base da planta, conforme Yokoyama et al. (2018), em três plantas por repetição nos estádios V<sub>6</sub>, V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub> no Experimento I e em dez plantas por repetição no Experimento II.

### 3.10.4 Índice de área foliar

O índice de área foliar será realizado por um método destrutivo utilizado por Curtt (2019), em uma planta por repetição escolhida de forma aleatória.

Para a determinação, todas as folhas de cada planta foram destacadas da haste, armazenadas em saco de papel. Em seguida, as mesmas folhas foram digitalizadas por meio de um scanner. As imagens foram arquivadas em uma resolução de 300 dpi e posteriormente processadas por meio do software ImageJ. O software foi desenvolvido pelo *Wayne Rasband* no *National Institute of Mental Health, USA*, em linguagem Java, onde processa as imagens pela sua intensidade ou escala de cinza dos pixels (HANNICKEL et al., 2012). O resultado com a área foliar total foi gerado através do processamento de todas os arquivos de entrada de cada planta, o resultado foi expresso em centímetros quadrados (cm<sup>2</sup>). Ao final foi gerado o índice de área foliar (IAF).

A análise foi realizada nos estádios V<sub>6</sub> e R<sub>2</sub> no experimento I e em V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub> no Experimento II.

### 3.10.5 Análises bioquímicas

Para a obtenção das amostras foliares, foi padronizado o horário de coleta entre 08:00 e 10:00 da manhã, coletando as folhas completamente expandidas do terço médio das plantas. Após a coleta, foram colocadas em sacos plásticos envolvidos em papel alumínio, congeladas em nitrogênio líquido para a paralisação das reações e posteriormente enviadas para laboratório onde foram armazenadas em freezer a  $-20^{\circ}\text{C}$  até o momento da realização das análises.

O material vegetal foi extraído por meio da trituração com o auxílio de nitrogênio líquido. Em seguida, 200 mg de material vegetal foram macerados com 4 mL de tampão de fosfato de potássio  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  pH 6,8. As amostras foram então, transferidas para Eppendorf's e centrifugadas a 10.000 rpm por 30 minutos a  $4^{\circ}\text{C}$ . As amostras foram armazenadas a  $-20^{\circ}\text{C}$  para posteriormente realizar a determinação das proteínas, conforme realizado por Teixeira et al. (2019) e Soares (2016). O material foi utilizado para determinação da atividade da enzima peroxidase (POD) e teor de prolina.

As análises foram realizadas somente no Experimento I, coletando as folhas no estádio R<sub>2</sub> em uma planta por repetição.

#### 3.10.5.1 Peroxidase

A determinação da atividade da peroxidase (POD) foi realizada de acordo com Teisseire e Guy (2000). Para tal, foi adicionado a um tubo de ensaio 500  $\mu\text{L}$  de tampão fosfato de potássio  $50 \text{ mmol L}^{-1}$  pH 6,5, 30  $\mu\text{L}$  de extrato enzimático, 250  $\mu\text{L}$  de pirogalol (1, 2,3-benzenotriol),  $20 \text{ mmol L}^{-1}$  e 220  $\mu\text{L}$  de peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ( $5 \text{ mmol L}^{-1}$ ), totalizando um volume de 1 mL. Os tubos de ensaio foram deixados em temperatura ambiente por cinco minutos. Logo após, a formação de purpurogalina foi medida em espectrofotômetro UV-visível a 430 nm.

Para o cálculo da atividade da enzima foi utilizado o coeficiente de extinção molar da purpurogalina de  $2,5 \text{ mmol L}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ , sendo a atividade expressa em  $\mu\text{mol}$  [purpurogalina]  $\text{min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$  [proteína].

#### 3.10.5.2 Teor de prolina

A prolina foi determinada de acordo com o método proposto por Bates et al. (1973). O extrato foi obtido pela adição de 5 mL de ácido sulfossalicílico (3%) em cerca de 200 mg de

folhas frescas, sendo a mistura deixada em agitação constante por uma hora à temperatura ambiente (25°C). Após esse período, as amostras foram centrifugadas a 3.000 rpm por 10 minutos, à temperatura ambiente. Para a reação, foram usados tubos de ensaio com tampa rosqueável, nos quais foi adicionado 1 mL de extrato, 1 mL de ninhidrina ácida (solução que contém 1,25 g de ninhidrina, em 30 mL de ácido acético glacial, e 20 mL de ácido fosfórico 6 M) e 1 mL de ácido acético glacial, deixando-se a mistura em banho-maria (100°C) por uma hora, para o desenvolvimento da cor. Em seguida, os tubos de ensaio foram colocados em banho de gelo por 10 minutos para cessar a reação. Por fim, foram adicionados 2 mL de tolueno, que tem por finalidade separar a porção orgânica da reação, onde estará contida a prolina. Após repouso, e formação da mistura bifásica, a fase superior foi retirada para a quantificação dos níveis de prolina livre, através de medidas de absorvância em 520 nm. Utilizou-se como branco apenas o tolueno.

O teor de prolina foi calculado com base em curva padrão de prolina, e os resultados foram expressos em  $\mu\text{mol g}^{-1}$  [MF].

### **3.10.6 Componentes de produção e produtividade**

#### **3.10.6.1 Experimento I**

Na determinação da produtividade em casa-de-vegetação, três plantas por repetição foram colhidas manualmente e trilhadas, onde os grãos de cada planta foram pesados em balança digital com precisão de 0,01 gramas. Para o cálculo da produtividade, ou seja, a produção por unidade de área, foi efetuada a determinação do teor de água dos grãos e foi corrigido para 13% ( $0,13 \text{ g g}^{-1}$ ). Os componentes de produção avaliados foram: número de vagens por planta, número de grãos por vagem, massa de mil grãos e produtividade.

#### **3.10.6.2 Experimento II**

Para o experimento a campo, 5 plantas da área útil (duas fileiras centrais) de cada parcela foram colhidas manualmente, descartando 1,5 m em cada extremidade. Após, as plantas foram trilhadas e os grãos foram submetidos as mesmas metodologias utilizadas para o Experimento I (casa-de-vegetação), sendo extrapolada para produtividade por hectare. Os componentes de produção avaliados foram: número de vagens por planta, massa de mil grãos,

número de nós haste principal, distância do entrenó (relação entre o tamanho da planta e o número de nós, expressa em centímetros e produtividade.

### **3.11 Análise estatística**

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância com a realização de teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Para a realização das análises, foi utilizado o software SAS.

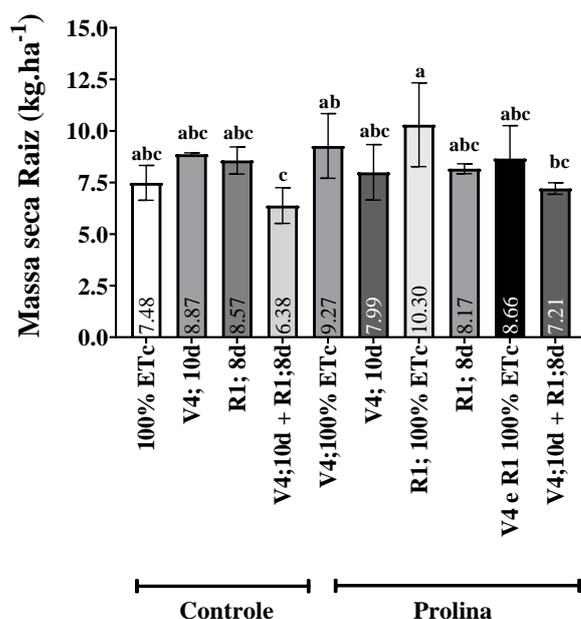
## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1.1 Massa de matéria seca**

#### **4.1.1.1 Raiz**

O sistema radicular possui papel importante para a absorção de água e nutrientes do solo, dar estrutura para o crescimento e desenvolvimento da planta, além de estar diretamente ligada a produtividade (VILLORDON; GINZBERG; FIRON, 2014). A modulação do desenvolvimento radicular resulta em uma melhor tolerância à estresses abióticos e consequentemente no aumento do rendimento (JEONG et al., 2013; REDILLAS et al., 2012; LEE et al. 2017; JEONG et al., 2010; LEEMHUIS, 2011).

A fim de verificar como aplicação de prolina foliar poderia influenciar no acúmulo de massa seca de raiz, foi realizado em casa-de-vegetação (Figura 2) condições divergentes de estresse hídrico. Com isso, obteve-se a maior massa seca de  $10 \text{ kg ha}^{-1}$  quando a planta recebeu aplicação de prolina em  $R_1$  e não foi submetida ao estresse hídrico (100% ETc), seguida do tratamento com aplicação de prolina em  $V_4$  e que recebeu 100% da evapotranspiração da cultura ( $9,27 \text{ kg ha}^{-1}$ ) durante todo o ciclo, apresentando um acréscimo de 61,44% e 45,30%, respectivamente, em relação ao tratamento que não recebeu a aplicação de prolina e submetido ao estresse de 10d em  $V_4$  e 8d em  $R_1$  ( $6,38 \text{ kg ha}^{-1}$ ).



**Figura 2.** Massa de matéria seca de raiz de soja (MSr, kg ha<sup>-1</sup>) no estágio fenológico R<sub>2</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-I<sub>PRO</sub>. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5 μM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Capinópolis, MG, safra 2021-2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV: 13,99. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.

Apesar do observado, a aplicação de prolina pode auxiliar no desenvolvimento inicial da planta atuando no aumento da massa seca da raiz (FORDE et al., 2013; BIANCUCCI et al., 2015). Em *Arabidopsis* sp., foi observado que o uso de prolina promoveu um maior alongamento das raízes através da modulação da taxa de divisão celular (BIANCUCCI et al., 2015). Corroborando, Teixeira et al. (2019) observaram que plantas submetidas a tratamento de semente e aplicação foliar de prolina, em regimes de ausência de estresse hídrico à estresse moderado, apresentaram maior matéria seca da raiz.

As raízes são órgãos extremamente importantes para as plantas, pois são responsáveis por buscar água e nutrientes em grandes quantidades no solo. Uma raiz primária maior, e/ou xilema com diâmetro maior em raízes mais profundas, e/ou raízes laterais maiores são capazes de absorver mais umidade e buscar mais água nas camadas mais inferiores do solo (HA et al., 2015). Portanto, um sistema radicular pouco desenvolvido geralmente é associado à grandes reduções na produtividade de grãos de soja (JUMRANI; BHATIA, 2019a).

Ao analisar plantas de soja submetidas ao estresse hídrico e térmico foi verificado uma redução da massa seca da raiz e do volume do sistema radicular em todos os tratamentos submetidos aos estresses isolados ou combinados, quando comparado ao controle (VITAL, 2019). Com isso, a falta de água pode afetar o crescimento das raízes com um menor turgor

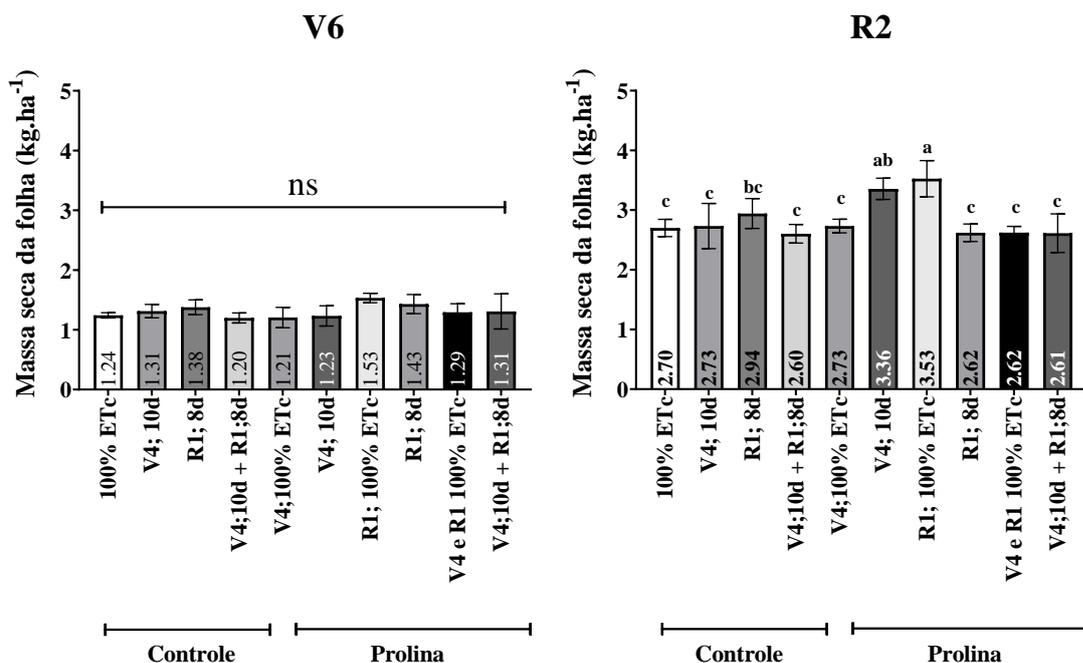
celular em condições de solo seco pela paralisação do alongamento e da divisão celular (PEDROL; RAMOS; REIGOSA, 2000).

Os resultados do presente trabalho demonstraram que a aplicação de prolina pode ter auxiliado a planta no desenvolvimento radicular mesmo quando em estresse hídrico e 100% ETC, sugerindo que a aplicação de prolina em plantas de soja de forma preventiva pode influenciar no melhor desenvolvimento radicular.

#### **4.1.1.2 Folha**

A falta de água é um dos tipos de estresse que mais vem afetando negativamente o desenvolvimento das culturas causando diversos problemas, como alterações no metabolismo (VALLIYODAN; NGUYEN, 2006), inibição da fotossíntese (OHASHI et al., 2006) e aumento do estresse oxidativo (PORCEL; RUIZ-LOZANO, 2004), as quais levam à diferentes adaptações fisiológicas e morfológicas na planta (XU et al., 2015).

Quando a planta é submetida ao estresse hídrico há uma alocação de fotoassimilados das folhas para as raízes e sementes, comportamento da planta visando sua sobrevivência às condições adversas (RICH; WATT, 2013; XU et al., 2015; CUELLAR-ORTIZ et al., 2008). Dessa forma, à redução da parte aérea e conseqüentemente diminuição da produção de matéria seca é considerado uma das primeiras reações da planta frente à falta de água (LARCHER, 2006; TAIZ; ZEIGER, 2013). Além disso, o estresse por seca leva a uma diminuição drástica da capacidade fotossintética das folhas de soja, afetando conseqüentemente o rendimento da cultura (OHASHI et al., 2006; KUNERT et al., 2016).



**Figura 3.** Massa de matéria seca de folha de soja (MSr, kg ha<sup>-1</sup>) nos estádios fenológicos V<sub>6</sub> e R<sub>2</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5 μM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Capinópolis, MG, safra 2021-2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV-V<sub>6</sub>: 10,79; CV-R<sub>2</sub>: 8,31. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.

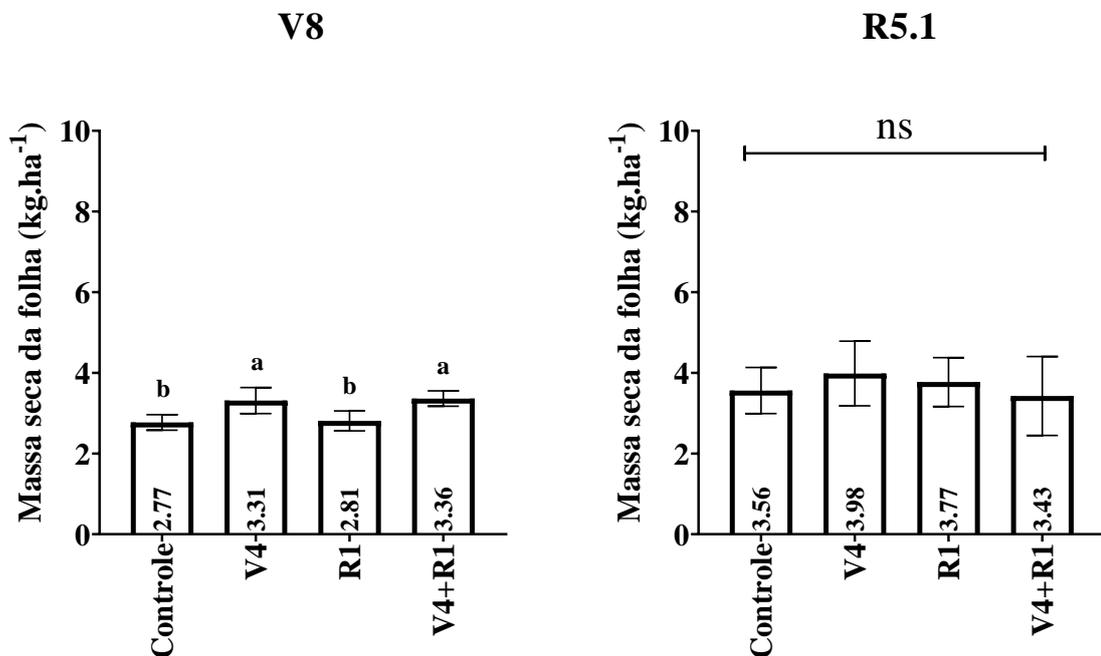
Analisando essa característica, na avaliação realizada no estágio V<sub>6</sub>, não foi possível observar diferenças significantes entre os tratamentos, sugerindo que aplicação de prolina apenas em V<sub>4</sub> não influencia na massa seca foliar. Avaliações em R<sub>2</sub>, o tratamento que recebeu aplicação de prolina em R<sub>1</sub> e 100% da ETc durante todo o ciclo, apresentou a maior média (3,53 kg ha<sup>-1</sup>), sendo significativamente igual ao tratamento que foi aplicado prolina, mas com 10d de estresse hídrico no estágio V<sub>4</sub> (3,36 kg ha<sup>-1</sup>), entretanto, significativamente diferente dos demais tratamentos, independente da aplicação ou não de prolina.

O aumento da área de absorção das raízes no tratamento com aplicação de prolina em R<sub>1</sub> e 100% da ETc, que obteve a maior média em massa de matéria seca das raízes (Figura 2), pode ter contribuído para que a planta conseguisse alcançar uma maior taxa de absorção de nutrientes, levando conseqüentemente a um maior desenvolvimento da parte aérea, evidenciado pelo maior acúmulo de massa seca das folhas no tratamento que recebeu aplicação de prolina em R<sub>1</sub> e 100% da ETc durante todo o ciclo (Figura 3).

Esse atributo é fundamental para as plantas pois, aumenta a área para a realização de fotossíntese, o que leva conseqüentemente a uma maior produção de fotoassimilados, que

podem ser utilizados durante o período de enchimento de grãos, aumentando assim a produtividade (BOARD; MODALE, 2005; SOARES, 2014).

No Experimento II desenvolvido a campo (Figura 4), os melhores resultados na primeira avaliação (Estádio V<sub>8</sub>) foram encontrados para os tratamentos que receberam aplicação de prolina no estágio V<sub>4</sub> (V<sub>4</sub> e V<sub>4</sub>+R<sub>1</sub>), se igualando estatisticamente entre si. Já os tratamentos controle (sem aplicação de prolina) e o tratamento que recebeu a aplicação de prolina em R<sub>1</sub>, que até o momento da avaliação haviam sido submetidos aos mesmos tratos (sem aplicação de prolina) foram os que demonstraram a menor média em relação aos demais tratamentos com 2,77 e 2,81 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.



**Figura 4. Massa seca de folha de soja (MSf, kg ha<sup>-1</sup>) nos estádios fenológicos V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5µM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Sorriso – MT, safra 2021-2022. Experimento II: Campo. CV-V<sub>8</sub>: 5,59; CV-R<sub>5.1</sub> 20,88. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.**

Na avaliação em R<sub>5.1</sub> (segunda avaliação) não foi observado diferenças entre os tratamentos que receberam a aplicação de prolina em diferentes estádios fenológicos (Figura 4). A não diferença entre os tratamentos pode ser atribuído a variação entre os dados coletados, apresentando um CV de 20,88, podendo sugerir que aplicação de prolina em V<sub>4</sub> é favorável para o incremento de massa seca das folhas, entretanto, diversas condições

ambientais podem ter aumentado a variação dos dados obtidos e, conseqüentemente a não significância dos tratamentos em R<sub>2</sub>.

#### 4.1.1.3 Haste

No Experimento I, quando se analisa a massa de matéria seca da haste (Figura 5), na primeira avaliação (realizada em V<sub>6</sub>) não foi observado diferenças significativas (Figura 5). Já na avaliação em R<sub>2</sub> o desempenho é similar ao verificado para a massa de matéria seca das folhas, com superioridade novamente para o tratamento com aplicação de prolina em R<sub>1</sub> e que recebeu 100% ETc durante o ciclo e menor média para o tratamento que recebeu estresse hídrico em V<sub>4</sub>;10d + R<sub>1</sub>;8d e que não recebeu aplicação de prolina.

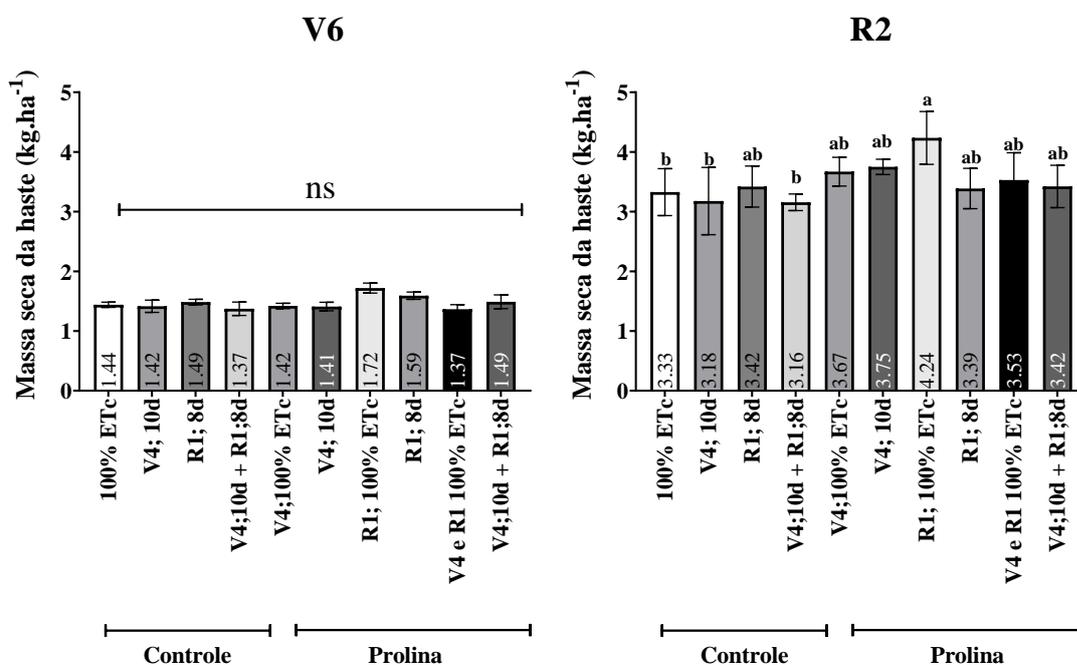


Figura 5. Massa de matéria seca de haste de soja (MSH, kg ha<sup>-1</sup>) nos estádios fenológicos V<sub>6</sub> e R<sub>2</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5μM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Capinópolis, MG, safra 2021-2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV-V<sub>6</sub>: 10,87; CV-R<sub>2</sub>: 10,22. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.

No experimento II (Figura 6), mesmo sendo estatisticamente iguais, observa-se uma tendência das maiores médias para os tratamentos 2 (aplicação de prolina em V<sub>4</sub>) e 4 (aplicação de prolina em V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub>), independente da época de avaliação.

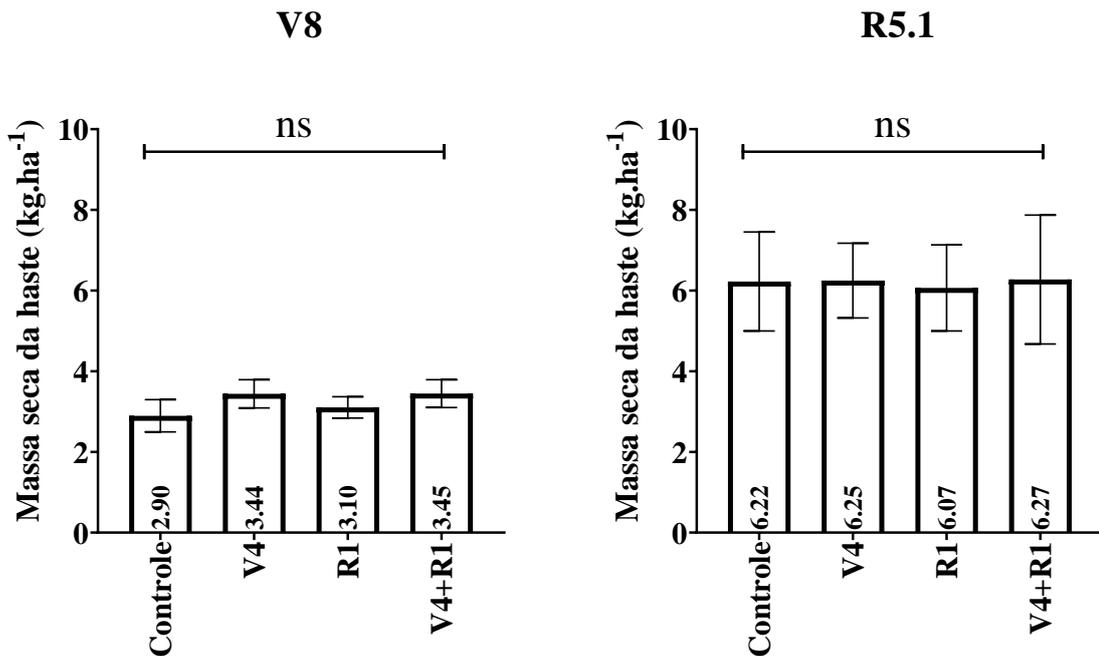
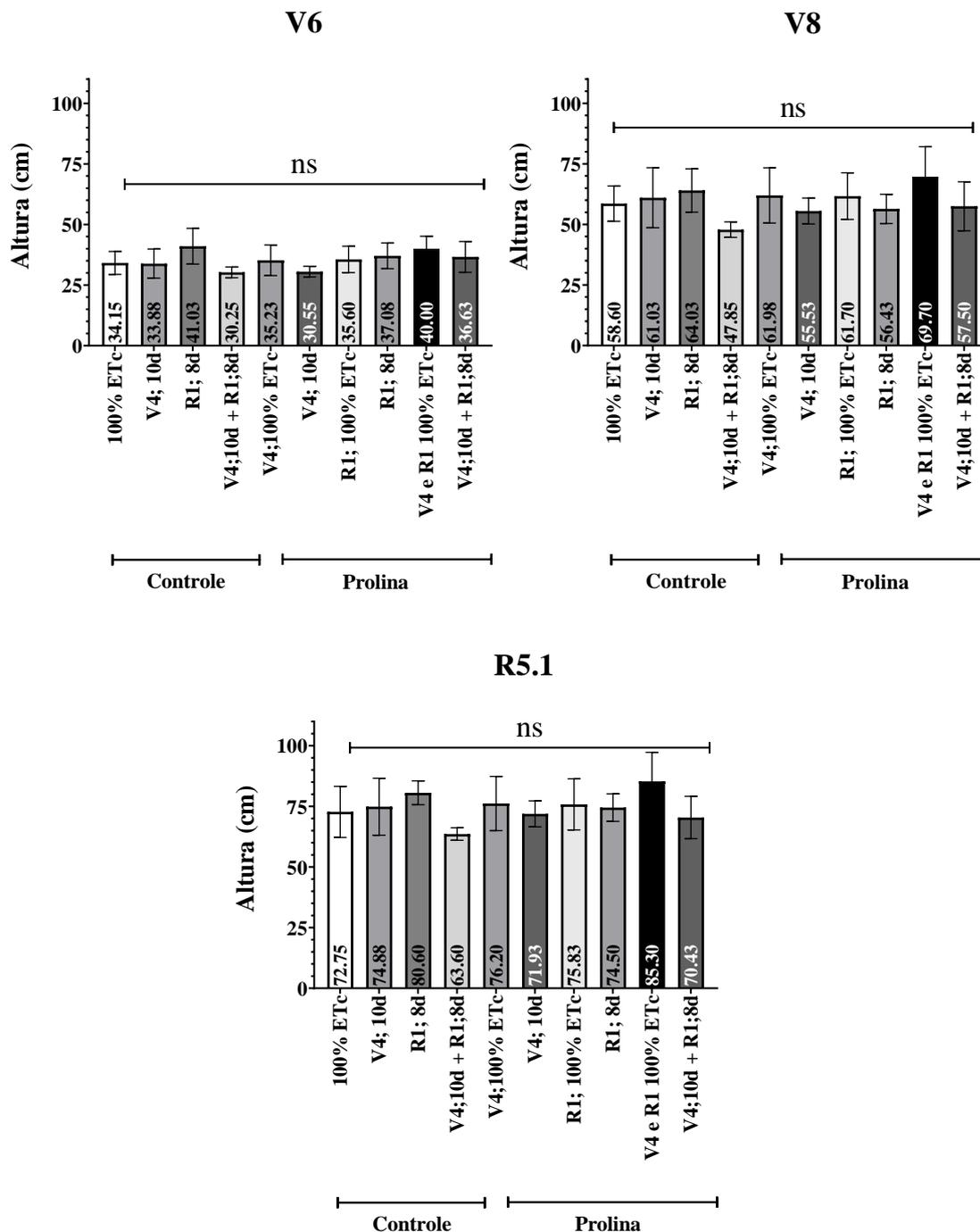


Figura 6. Massa de matéria seca de haste de soja (MSh, kg ha<sup>-1</sup>) nos estádios fenológicos V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5μM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Sorriso – MT, safra 2021-2022. Experimento II: Campo. CV-V<sub>6</sub>: 8,97; CV-R<sub>2</sub>: 22,58. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.

#### 4.1.2 Altura de planta

A água é essencial para o crescimento das células e manutenção da turgescência (CARNEIRO, 2011). A deficiência hídrica, altera a expressão gênica, fechamento dos estômatos e diminuição das trocas gasosas alterando processos, como: respiração, fotossíntese, absorção de íons e nutrientes, entre outros (CATUCHI et al., 2011; HATZIG et al., 2014), respostas que acarretam a redução do crescimento vegetal (GONÇALVES, 2013). Por este motivo, a redução do porte aéreo pode ser considerada como uma resposta das plantas expostas ao *deficit* hídrico (LARCHER, 2006; TAIZ; ZEIGER, 2013; GERGANOVA et al., 2016).

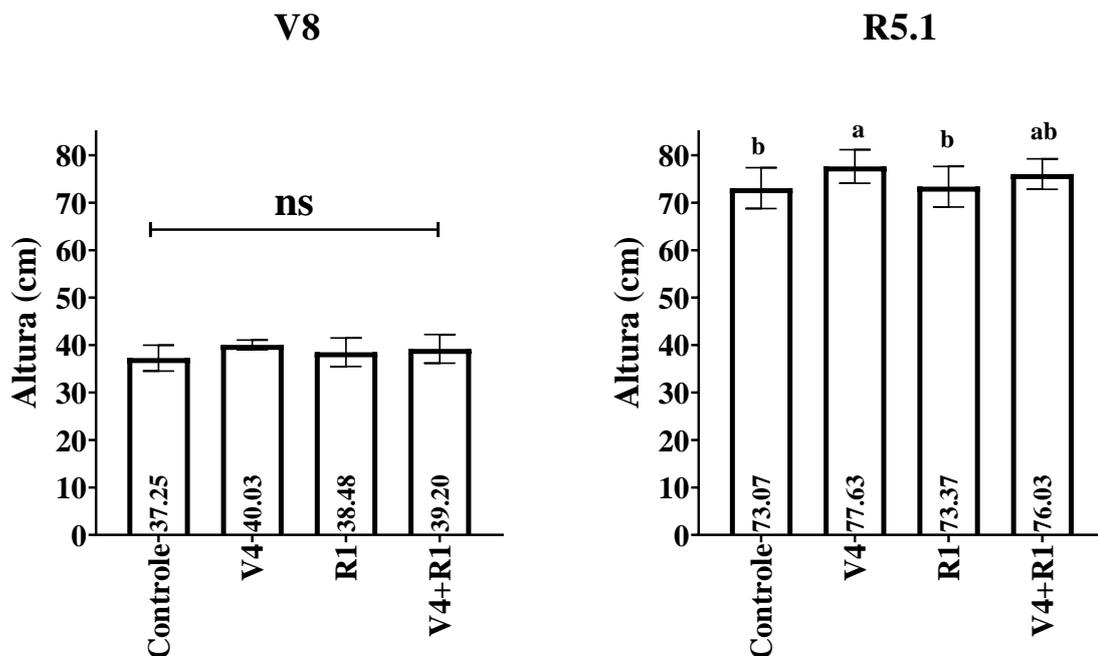
De acordo com os resultados encontrados no experimento em casa-de-vegetação (Figura 7) não foi possível observar diferenças significativas quanto à altura das plantas, em função da aplicação de prolina e submissão das plantas ao estresse hídrico. Porém, observou-se uma tendência na diminuição da altura das plantas nos tratamentos que foram submetidos à deficiência hídrica no estágio V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub> nas avaliações realizadas nos estádios V<sub>6</sub>, V<sub>8</sub> e R<sub>1</sub>, independente da aplicação de prolina em ambos os momentos (Figura 7).



**Figura 7.** Altura de planta de soja (H, cm) nos estádios fenológicos estádios fenológicos V<sub>6</sub>, V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5 $\mu$ M de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Capinópolis, MG, safra 2021-2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV-V<sub>6</sub>: 15,67; CV-V<sub>8</sub>: 15,95; CV-R<sub>5.1</sub>: 12,11. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.

No experimento II (Figura 8), desenvolvido em condições de estresse à campo, na primeira avaliação de altura de plantas, realizada em V<sub>8</sub>, mesmo não sendo visualizado resultados com diferenças estatísticas, foi verificado uma tendência das maiores médias para

os tratamentos que receberam aplicação de prolina no estágio vegetativo V<sub>4</sub> até o momento da avaliação (V<sub>4</sub> e V<sub>4</sub> + R<sub>1</sub>), que até esta data haviam sido submetidos aos mesmos procedimentos de aplicação de prolina em V<sub>4</sub>. Já a menor média (37,25cm) encontrada foi a do tratamento controle, sem aplicação de prolina, seguido do tratamento R<sub>1</sub> que até o momento não havia sido submetido a aplicação de prolina, sendo igual ao tratamento controle.



**Figura 8.** Altura de planta de soja (H, cm) nos estádios fenológicos V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub>. Cultivar **Brasmax-Extra-IPRO**. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5 $\mu$ M de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Sorriso – MT, safra 2021-2022. Experimento II: Campo. CV-V<sub>6</sub>: 5,23; CV-R<sub>2</sub>: 2,59. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ), ns: não significativo entre os tratamentos.

Na segunda avaliação, em R<sub>5.1</sub> o mesmo comportamento da avaliação 1 foi encontrado, todavia com repostas estatisticamente significativas. O tratamento que recebeu prolina em V<sub>4</sub>, obteve a maior média com 77,63 cm se diferenciando dos demais tratamentos, seguido do tratamento com aplicação de prolina em V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub>. Já os tratamentos controle e com aplicação de prolina em R<sub>1</sub>, foram os menores valores encontrados, com 73,07 cm e 73,37 cm, respectivamente (Figura 8).

Em plantas submetidas aos estresses térmico e hídrico combinados observou uma diminuição na altura das plantas que foram submetidas aos estresses (VITAL, 2019), mostrando que o estresse isolado ou a combinação entre eles, intensifica os danos fisiológicos e conseqüentemente afeta o desenvolvimento das plantas (FAHAD et al., 2017; CARMO-SILVA et al., 2012; PRADHAN et al., 2012).

O tratamento com estresse em V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub> e sem aplicação de prolina obteve as menores médias de altura nos três momentos de avaliação (Figura 7) com 30,25cm na avaliação realizada no estádio V<sub>6</sub>, 47,85cm em V<sub>8</sub> e 63,60 em R<sub>5.1</sub>. Já o tratamento submetido a aplicação de prolina nos estádios V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub> e sem estresse hídrico, alcançou a maior média em altura nas avaliações em V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub> (Figura 7) com 69,70cm e 85,30cm respectivamente.

Palharini (2016) mostra que as cultivares que foram submetidos ao estresse hídrico apresentaram uma redução da taxa de crescimento comparado a todas as outras cultivares sem o período de estresse. Resultado semelhante foi encontrado por Gava (2014) que observou que a falta de água afetou drasticamente o desenvolvimento da soja, diminuindo seu crescimento em altura total.

Huang e Fu (2000) explicam que devido à redução da fotossíntese causada pelo estresse hídrico, o desenvolvimento das plantas é afetado, comportamento que pode ser observado ao longo do trabalho.

#### **4.1.3 Diâmetro da haste**

No Experimento I, na primeira avaliação (estádio V<sub>6</sub>) foi observado que o tratamento que recebeu 100% da evapotranspiração durante todo o ciclo cultura e com aplicação de prolina no estádio V<sub>4</sub>, obteve a maior média em comparação aos demais tratamentos (Figura 9).

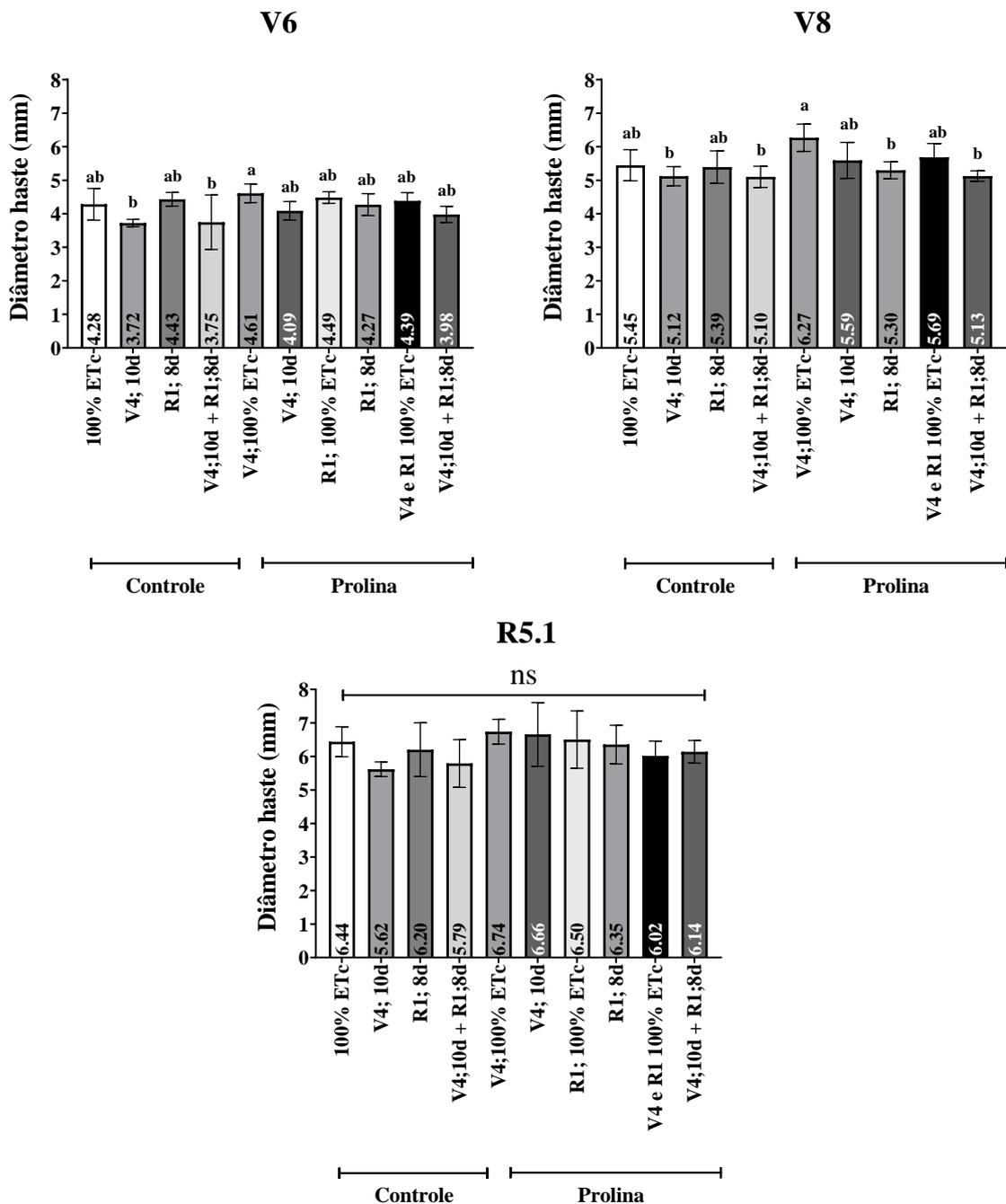


Figura 9. Diâmetro da haste de plantas de soja (Dh, mm). nos estádios fenológicos estádios fenológicos V<sub>6</sub>, V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5µM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Capinópolis, MG, safra 2021-2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV-V<sub>6</sub>: 7,77; CV-V<sub>8</sub>: 6,93; CV-R<sub>5.1</sub>: 9,9. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.

Os menores valores foram observados nos tratamentos que receberam estresse hídrico em V<sub>4</sub> (V<sub>4</sub>; 10d) e V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub> (V<sub>4</sub>; 10d + R<sub>1</sub>; 8d), respectivamente, que até aquele momento

foram tratados iguais, com estresse hídrico em V<sub>4</sub> e sem aplicação de prolina (Figura 9). Não foi observado diferenças estatísticas com os demais tratamentos realizados (Figura 9).

Na segunda avaliação, realizada no estágio V<sub>8</sub>, a maior média foi encontrada no tratamento com aplicação de prolina em V<sub>4</sub>; 100% ETc (Figura 8). Semelhante à primeira análise, os menores valores de diâmetro do caule foram observados nos tratamentos que receberam estresse hídrico em V<sub>4</sub> (V<sub>4</sub>; 10d) e V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub> (V<sub>4</sub>; 10d + R<sub>1</sub>; 8d) e não receberam aplicação de prolina, seguido do tratamento que recebeu estresse hídrico em V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub> (V<sub>4</sub>; 10d + R<sub>1</sub>; 8d) e recebeu aplicação de prolina. Estes tratamentos passaram por um período de 10 dias sem irrigação no estágio V<sub>4</sub> (Figura 8).

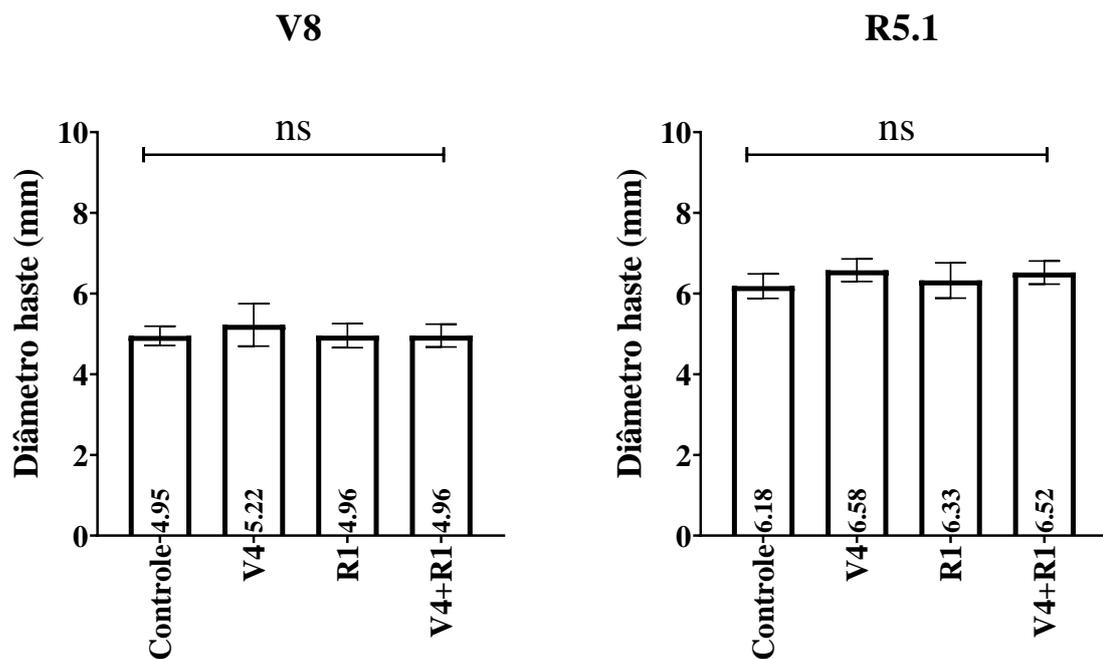
Na avaliação realizada em R<sub>5,1</sub>, não foi encontrado diferenças significativas entre os tratamentos, mas foi observado as maiores médias nos tratamentos com aplicação de prolina em V<sub>4</sub>; 100% ETc, V<sub>4</sub>;10d e em R<sub>1</sub>; 100% ETc, com 6,74 mm, 6,66 mm e 6,50 mm, respectivamente (Figura 9).

A haste possui papel muito importante no acúmulo e transporte de fotoassimilados para os drenos. Sugere-se que uma haste com um diâmetro maior poderá por consequência levar mais energia para as vagens e grãos em enchimento.

Os menores valores foram observados nos tratamentos 2 (V<sub>4</sub>; 10d) e 4 (V<sub>4</sub>; 10d + R<sub>1</sub>; 8d) com médias de 5,62 mm e 5,79 mm, respectivamente. Ambos foram submetidos ao estresse hídrico e sem aplicação de prolina (Figura 9).

Medeiros et al. (2012) demonstram que o diâmetro da haste e área foliar também são características que são influenciadas pelo turgor celular. Os menores valores do diâmetro do caule indicam que a planta teve menor capacidade de transportar água da raiz para a parte aérea e que consequentemente prejudicou a expansão foliar (PITTERMANN, 2010; VITAL, 2019).

No Experimento II (condições de campo), não foram observadas diferenças estatísticas nas avaliações realizadas nos estádios V<sub>8</sub> e R<sub>5,1</sub>, entretanto em ambas as avaliações houve uma tendência de melhores valores para os tratamentos com aplicação de prolina em V<sub>4</sub> e V<sub>4</sub> + R<sub>1</sub>, e menores médias para os tratamentos controle e quando aplicado apenas prolina em R<sub>1</sub> (Figura 10).



**Figura 10.** Diâmetro da haste de plantas de soja (Dh, mm) nos estádios fenológicos V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5 $\mu$ M de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Sorriso – MT, safra 2021-2022. Experimento II: Campo. CV-V<sub>6</sub>: 5,70; CV-R<sub>2</sub>: 5,02. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ), ns: não significativo entre os tratamentos.

#### 4.1.4 Teor de clorofila total

A clorofila é um pigmento fotossintético que absorve bandas espectrais nas regiões vermelha azul (450 nm) e (670 nm) e por este motivo pode ser usada para medir a capacidade da planta em utilizar a luz (SMITH, 2001; ZHANG et al., 2016). A clorofila a (Chl a) juntamente com a clorofila b (Chl b) corresponde à aproximadamente 65% dos pigmentos das plantas (SAHOO; RAY; MANJUNATH, 2015), onde a Chl a + b representa o teor de clorofila total nas folhas.

Experimento I, os teores de clorofila total não diferiram entre os tratamentos em todas as avaliações realizadas (V<sub>6</sub>, V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub>), independente da época de aplicação de prolina e submissão ao estresse hídrico (Figura 11).

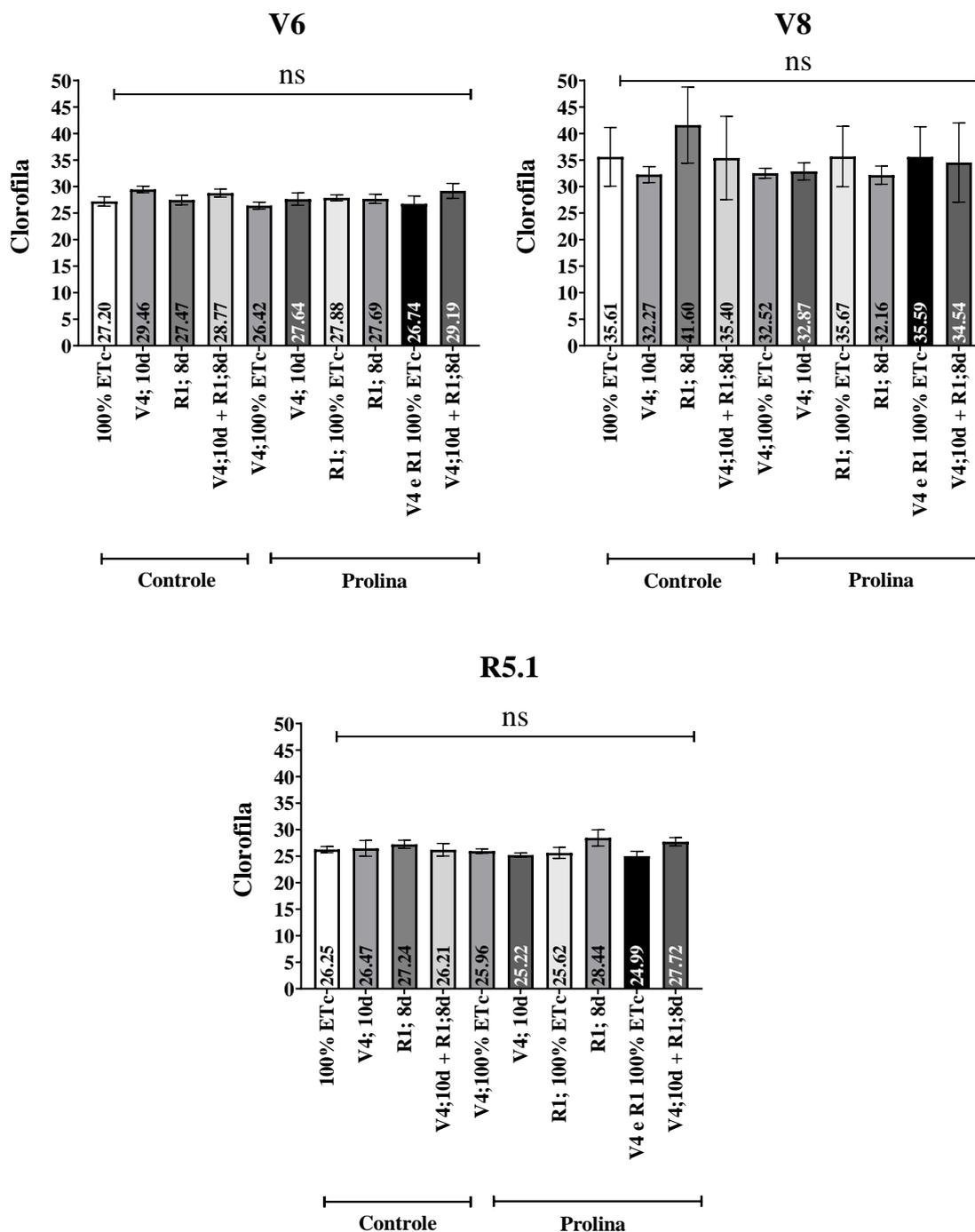
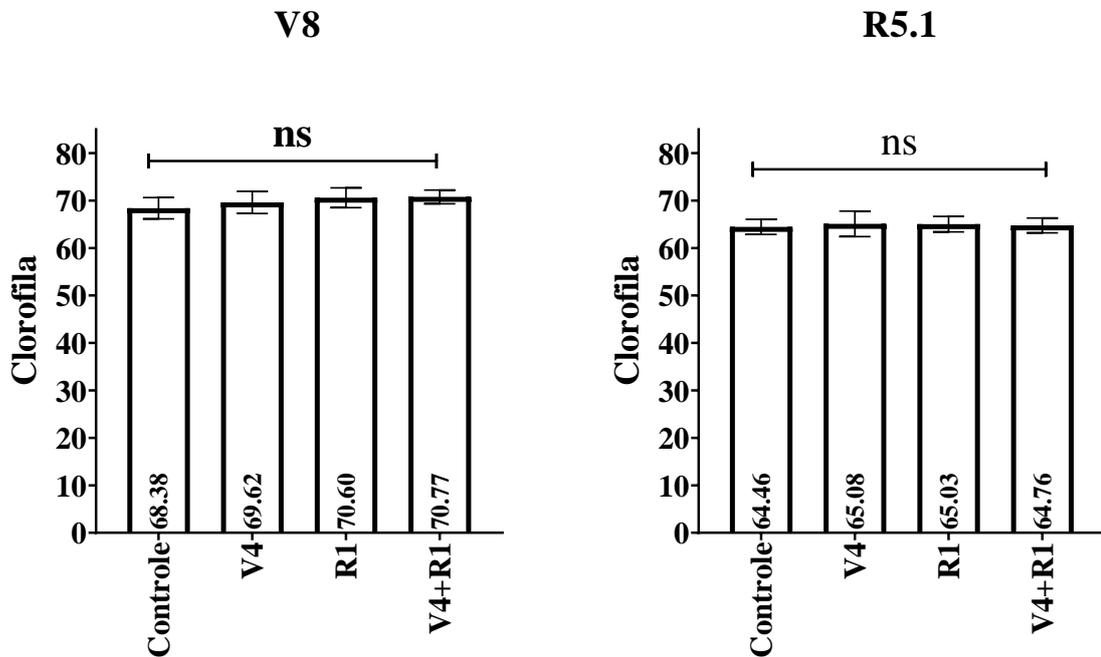


Figura 11. Teor de Clorofila Total em folhas de plantas de soja (TcT), nos estádios fenológicos estádios fenológicos V<sub>6</sub>, V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5μM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Capinópolis, MG, safra 2021-2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV-V<sub>6</sub>: 7,32; CV-V<sub>8</sub>: 14,54; CV-R<sub>5.1</sub>: 7,72. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.

Conforme observado no primeiro experimento, o Experimento II, em condições de campo não obteve diferenças significativas nos teores de clorofila total (Figura 12), todavia

pode-se observar em ambas as avaliações, nos estádios V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub>, uma diminuição da média no tratamento controle, sem aplicação de prolina em V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub> (Figura 12).



**Figura 12.** Teor de clorofila total em folhas de plantas de soja (TcT, mg cm<sup>-2</sup>) nos estádios fenológicos V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5µM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Sorriso – MT, safra 2021-2022. Experimento II: Campo. CV-V<sub>6</sub>: 2,92; CV-R<sub>2</sub>: 2,95. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.

Este comportamento pode ser explicado pela ação do aminoácido na tolerância aos estresses que a planta estava passando durante o ciclo. Segundo Buezo et al. (2019), Cui et al. (2019) e Dubey et al. (2019), quando as plantas são submetidas a situações de seca os teores totais de clorofila nas folhas diminuem, tanto em variedades sensíveis quanto tolerantes, sendo que nas primeiras essa redução é mais significativa.

Hossain et al. (2014) afirmam que quando o estresse hídrico é intensificado no solo, os teores de água e de clorofila total são reduzidos dentro da folha em comparação com plantas tratadas em condições normais. Jumrani e Bhatia (2019b) complementam que, além da diminuição do teor de clorofila, a falta de água afeta os fotossistemas, a síntese de energia (ATP e NADPH), transporte de elétrons além da distribuição e utilização dos fotoassimilados.

#### 4.1.5 Índice de área foliar

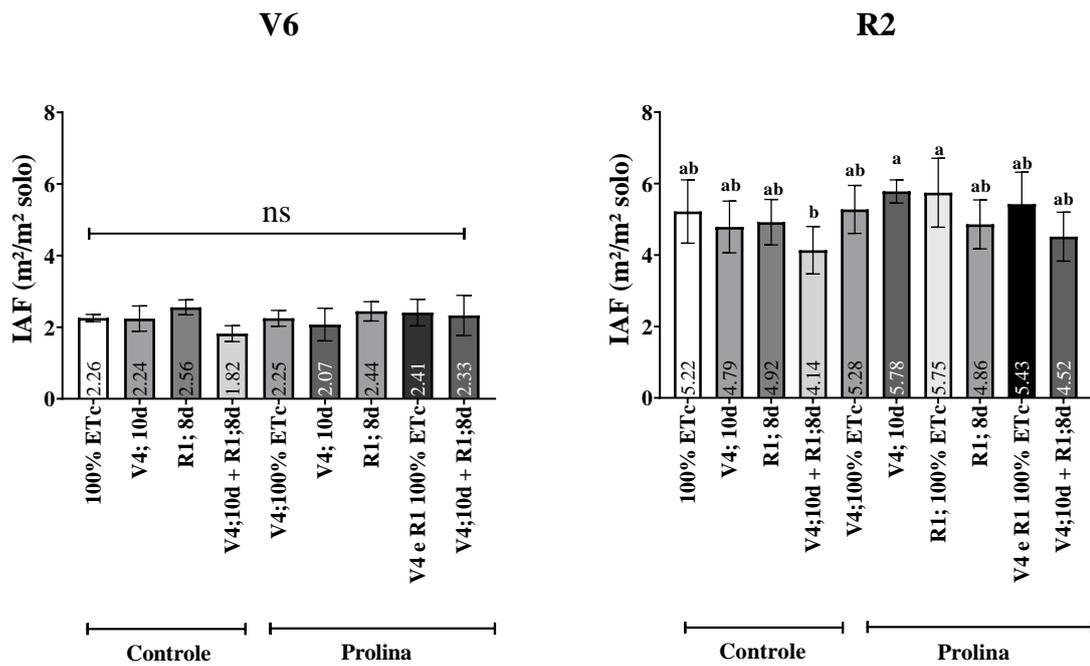
O índice de área foliar (IAF) é considerado um parâmetro muito importante de crescimento pois, em conjunto com a arquitetura das plantas influenciam na interceptação de luz solar e no sombreamento das folhas do baixeiro pelas folhas localizadas na região superior da planta, características extremamente importantes para que a soja possa expressar todo o seu rendimento máximo (BOARD; HARVILLE, 1992; YOKOYAMA et al., 2018).

O IAF é a relação entre a área das folhas e a área ocupada pela planta no solo. Essa variável possui relação direta com a produtividade, visto que com um maior IAF a planta possui maior capacidade de interceptar a luz solar apresentando uma maior produção de fotoassimilados e uma maior taxa de acúmulo de biomassa maior nos grãos (BALBINOT JÚNIOR et al., 2018).

A diminuição da área foliar pode ser considerada uma resposta das plantas quando são submetidas à deficiência hídrica, principalmente no período vegetativo. Há essa redução para que a planta tenha condições de diminuir a transpiração e perda de água. (TAIZ; ZEIGER, 2013).

De acordo com Jaleel et al. (2009b) e Machado-Júnior (2015), uma das maiores consequências causadas pelo *deficit* hídrico é a diminuição do crescimento das folhas, levando a um menor índice de área foliar, que resulta em menores ganhos em biomassa.

Na casa-de-vegetação na avaliação realizada em V<sub>6</sub> não foi observado significância estatística entre os resultados, todavia verificou-se que o menor valor foi observado no tratamento que recebeu estresse hídrico no estágio V<sub>4</sub> e não foi submetida a aplicação de prolina (Figura 13).



**Figura 13.** Índice de área foliar de plantas de soja (IAF, m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>) nos estádios fenológicos estádios fenológicos V<sub>6</sub> e R<sub>2</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5μM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Capinópolis, MG, safra 2021-2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV-V<sub>6</sub>: 14,34; CV-R<sub>2</sub>: 11,34. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.

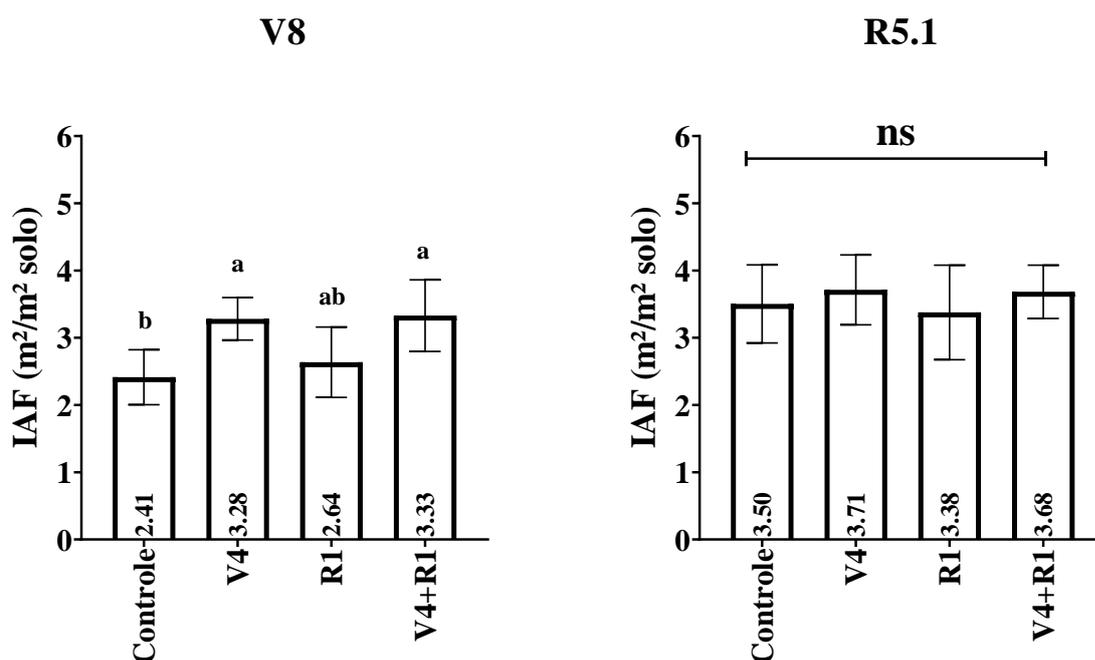
No estágio R<sub>2</sub>, o tratamento que recebeu aplicação de prolina e não recebeu estresse hídrico em R<sub>1</sub> (R<sub>1</sub>; 100% x ETc) com a melhor média em comparação aos demais tratamentos e se igualando estatisticamente ao tratamento que recebeu aplicação de prolina e estresse hídrico nos estádios R<sub>1</sub> e V<sub>4</sub>, respectivamente. A menor média foi encontrada no tratamento que não recebeu aplicação de prolina e foi submetido ao estresse nos dois momentos (V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub>). Os demais tratamentos não se diferenciaram entre si de acordo com o teste estatístico utilizado (Figura 13).

Vital (2019) observou que quando submetida ao estresse hídrico e térmico, a cultura de soja apresentou menores valores de área foliar, número de folhas e massa seca da parte aérea, resultado semelhante obtido por Almeida (2019), mostra que esse comportamento é resultado da limitação da assimilação de CO<sub>2</sub> devido à restrição hídrica. Castro et al. (2019), através de um experimento utilizando diferentes cultivares de soja, também verificaram diminuição da área foliar em função da deficiência hídrica.

Ullah et al. (2018) explicam que uma menor taxa de expansão foliar e diminuição no crescimento da parte aérea é esperada durante a deficiência hídrica, além de senescência foliar acelerada e redução na produção e na distribuição de fotoassimilados (HOSSAIN; LAM; ZHANG, 2015; CATUCHI et al., 2011; HATZIG et al., 2014).

Mathobo et al. (2017) também observaram que o estresse hídrico em todos os momentos analisados resultou em menores valores de matéria seca, índice de área foliar, número de vagens e na produtividade (PEREIRA, 2017).

No Experimento II (Figura 14) os valores de IAF acompanharam o comportamento encontrado nas avaliações de matéria seca da folha (Figura 4) e haste (Figura 6). A avaliação em V<sub>8</sub> mostrou diferenças significativas para o tratamento de prolina em V<sub>4</sub>, com IAF de 3,28 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> e o tratamento com uso de prolina em V<sub>4</sub> + R<sub>1</sub>, com IAF de 3,33 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>, seguido dos tratamentos com uso de prolina em R<sub>1</sub> (IAF de 2,64 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>) e tratamento controle, com IAF de 2,41 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> (Figura 14) representando os tratamentos com os menores valores.



**Figura 14.** Índice de área foliar de plantas de soja (IAF, m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>) nos estádios fenológicos V<sub>8</sub> e R<sub>5.1</sub>. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com 5μM de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Sorriso – MT, safra 2021-2022. Experimento II: Campo. CV-V<sub>8</sub>: 13,21; CV-R<sub>5.1</sub>: 18,39. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (p<0,05), ns: não significativo entre os tratamentos.

Na avaliação II não foi observado significância estatística entre os resultados, todavia verificou-se maiores valores para os tratamentos com prolina em V<sub>4</sub> e com prolina em

V<sub>4</sub> + R<sub>1</sub>, e menores valores para os tratamentos controle e apenas com prolina em R<sub>1</sub> (Figura 14).

#### **4.1.6 Análises bioquímicas (Experimento I)**

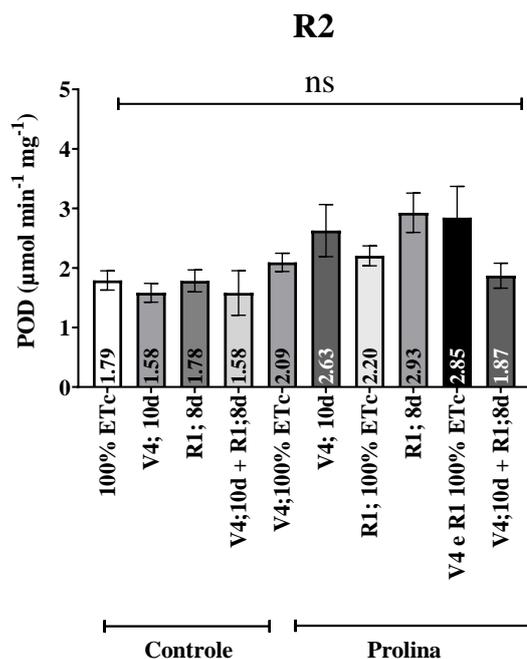
##### **4.1.6.1 Peroxidase (POD)**

Quando uma planta é submetida ao estresse ocorre a formação de espécies reativas de oxigênio (ERO) que em grande quantidade dentro do metabolismo da planta causam danos oxidativos severos (HALLIWELL; GUTTERIDGE, 2006). Diante da produção das ERO, a defesa do metabolismo está associada a ativação de mecanismos enzimáticos e não enzimáticos que constituem um sistema antioxidante (HASANUZZAMAN et al., 2013). Quando há um desequilíbrio entre a produção de espécies reativas de oxigênio e a atuação do sistema de defesa, ocorre o estresse oxidativo (SCANDALIOS, 2005).

Sob condições de estresse, a prolina é produzida em maior quantidade por meio da via do glutamato, promovendo seu acúmulo no vacúolo ou citosol (HAYAT et al., 2012; MWENYE et al., 2016; JALEEL et al., 2007). Adicionalmente, algumas enzimas antioxidantes como a dismutase do superóxido (SOD), a catalase (CAT) e as peroxidases (POD) são ativadas para combater as ERO (HASANUZZAMAN et al., 2013).

A peroxidase está envolvida em inúmeros processos metabólicos, como no metabolismo de lignificação, das auxinas, tolerância a estresses salinos e por metais pesados (PASSARDI et al., 2005). O seu aumento é considerado uma resposta metabólica associado a diferentes tipos de estresses e, portanto, vem sendo utilizada como parâmetro metabólico durante alterações de crescimento e condições de estresses ambientais (CAKMAK; HORST, 1991; ANDERSON; PRASAD; STEWART, 1995; ZHANG; KIRKHAM, 1996; JIMÉNEZ et al., 1998; MORAES et al., 2002).

Com objetivo de observar o efeito da aplicação de prolina na cultura da soja em condição de estresse hídrico na atividade da Peroxidase, foi instalado o Experimento I em condições controladas de casa-de-vegetação (Figura 15).



**Figura 15.** Teor de peroxidase em folha de planta de soja (POD,  $\mu\text{mol}$  [purpurogalina]  $\text{min}^{-1}$   $\text{mg}^{-1}$  [Proteína]) no estágio fenológico R2. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com  $5\mu\text{M}$  de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Capinópolis, MG, safra 2021-2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV: 30,12. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ), ns: não significativo entre os tratamentos.

Os resultados ilustrados na Figura 15 mostram que mesmo não obtendo diferenças significativas entre os tratamentos verificou-se os maiores teores de peroxidase para os tratamentos que receberam estresse hídrico e aplicações de prolina. A maior média foi encontrada para o tratamento que recebeu estresse hídrico por 8 dias e aplicação de prolina em R<sub>1</sub> (2,93). Por outro lado, as menores médias (1,58) foram encontradas para os tratamentos que foram submetidos ao estresse hídrico em V<sub>4</sub> e em V<sub>4</sub> + R<sub>1</sub>.

Resultados encontrados por Hoque et al. (2007) mostram que a aplicação exógena de prolina auxiliou a combater o estresse oxidativo induzido pela alta salinidade na cultura do tabaco. Os autores indicam que a prolina ativou algumas enzimas antioxidantes como é o caso da POD.

Ozden, Demirel e Kahraman (2009) avaliaram o efeito da prolina exógena em videira submetida a estresse por H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, e observaram que o aminoácido agiu dentro do metabolismo da planta diminuindo os índices de peroxidação lipídica e aumentando as atividades de algumas enzimas antioxidantes como a peroxidase. Os autores afirmam que o uso da prolina de forma exógena proporcionou um efeito positivo no sistema de defesa enzimático em reposta a esse tipo de estresse. Resultados semelhantes foram verificados por Hossain,

Hasanuzzaman e Fujita (2011) no qual plantas de feijão tratadas com um sal que continha prolina, mostraram um aumento nos teores das enzimas antioxidantes e diminuição dos níveis de  $H_2O_2$ .

Os resultados deste trabalho indicam que a aplicação exógena da prolina pode ter auxiliado a planta na ativação do sistema antioxidante de defesa através da ativação da POD.

#### 4.1.6.2 Prolina

O aumento da concentração intracelular de prolina indica o nível de estresse que a planta está sendo submetida, sendo que sua produção/acúmulo é aumentada como um mecanismo de tolerância a diversos tipos de estresses. Isso ocorre pois, ela está envolvida em diversas atividades como, na osmorregulação, antioxidação e proteção de enzimas (SZABADOS; SAVOURÉ, 2010; JIMÉNEZ et al., 2013).

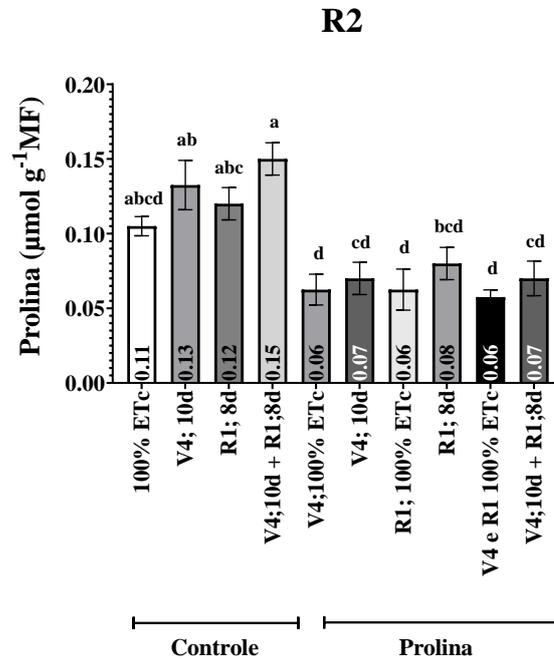
Conforme ilustrado na Figura 16, as maiores concentrações de prolina nas folhas foram observados nos tratamentos sem aplicação de prolina e que foram submetidas a estresse hídrico em  $V_4$ ,  $R_1$  e  $V_4$  e  $R_1$ , seguidas pelo controle sem aplicação de prolina e sem submissão ao *deficit* hídrico. Observou-se ainda, médias superiores nos tratamentos que receberam prolina e que foram submetidas ao estresse hídrico em  $V_4$ ,  $R_1$  e  $V_4$  e  $R_1$ .

Sabe-se que a planta submetida ao estresse hídrico passa a acumular a prolina mais rapidamente na folha e assim como foi observado nos resultados do presente trabalho, Lobato et al. (2008) ao estudarem o comportamento bioquímico da soja submetida à deficiência hídrica no início da fase reprodutiva observaram um aumento de aproximadamente 67% nos teores de prolina, em relação ao tratamento padrão.

Em pesquisa sobre a influência do *deficit* hídrico em diversas cultivares de soja, Masoumi et al. (2011) verificaram que todos os cultivares apresentaram acréscimos nos teores de prolina conforme as plantas eram expostas a condições mais severas de estresse. Resultados semelhantes foram obtidos por Moussa e Abdel-Aziz (2008) que, em estudos com dois cultivares de milho sob condições de estresse hídrico, observaram incrementos nos teores de prolina à medida que as plantas eram expostas a condições estressantes.

Vale salientar que, o aumento na concentração de prolina nos tecidos é muito importante para diminuir o nível de estresse que a planta está submetida, todavia a sua produção em demasia é prejudicial, pois além de consumir cerca de 0,4 a 0,6% do nitrogênio total presente nas folhas, que está sendo utilizado para as funções de crescimento, esse

aminoácido em grande quantidade pode ser tóxico para as plantas e inibir as funções citadas (ERNST; NELISSEN; BOOKUM, 2000).



**Figura 16.** Teor de prolina em folha de planta de soja (Prolina,  $\mu\text{mol g}^{-1}[\text{MF}]$ ) no estágio fenológico R2. Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Não tratadas (Controle) e tratadas com  $5\mu\text{M}$  de Prolina via aplicação foliar em diferentes momentos de aplicação. Capinópolis, MG, safra 2021-2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV: 24,61. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ), ns: não significativo entre os tratamentos.

Os tratamentos que não foram submetidos ao *deficit* de água e que receberam aplicações de prolina, obtiveram os menores resultados da concentração deste aminoácido, indicando que a planta conseguiu usar os teores fornecidos e responder nos parâmetros avaliados (Figura 16).

#### 4.1.7 Componentes de produção e produtividade

##### 4.1.7.1 Experimento I (casa-de-vegetação)

Os componentes de produção e produtividade (número de vagens por planta de soja, número de grãos por vagem de soja, massa de 1000 grãos de soja e produtividade) de plantas de soja estão ilustrados na Tabela 11.

**Tabela 11. Número de vagens por planta de soja (Nvp, vagens planta<sup>-1</sup>), Número de grãos por vagem de soja (Ngv, grãos vagem<sup>-1</sup>), Massa de 1000 grãos de soja (M1000, g) e Produtividade de grãos de soja (P, kg ha<sup>-1</sup>), nos diferentes tratamentos (Tr). Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Aplicação exógena de prolina (5 µM). Capinópolis, MG. Safra 2021/2022. Experimento I: Casa-de-vegetação. CV<sub>Nvp</sub>: 17,58; CV<sub>Ngv</sub>: 6,04; CV<sub>M1000</sub>: 11,83; CV<sub>P</sub>: 22,95. Capinópolis, MG.**

Tr	Descrição	Estresse	Nvp <sub>ns</sub>	Ngv <sub>ns</sub>	M1000 <sub>ns</sub>	P <sub>ns</sub>
1	Controle	100% ETc	28,67	2,32	140,20	3919,00
2	Controle. Estádio V <sub>4</sub>	10 dias sem irrigar	26,88	2,40	145,59	3955,00
3	Controle. Estádio R <sub>1</sub>	8 dias sem irrigar	27,11	2,35	129,03	3489,00
4	Controle. Estádio V <sub>4</sub>	10 dias sem irrigar	27,92	2,26	139,07	3738,00
	Controle. Estádio R <sub>1</sub>	8 dias sem irrigar				
5	Prolina. Estádio V <sub>4</sub>	100% ETc	36,44	2,37	131,23	4831,00
6	Prolina. Estádio V <sub>4</sub>	10 dias sem irrigar	32,50	2,45	144,35	4828,00
7	Prolina. Estádio R <sub>1</sub>	100% ETc	32,33	2,40	145,67	4864,00
8	Prolina. Estádio R <sub>1</sub>	8 dias sem irrigar	29,33	2,39	151,12	4459,00
9	Prolina. Estádio V <sub>4</sub>	100% ETc	35,67	2,34	140,23	4961,00
	Prolina. Estádio R <sub>1</sub>	100% ETc				
10	Prolina. Estádio V <sub>4</sub>	10 dias sem irrigar	26,50	2,26	156,80	4079,00
	Prolina. Estádio R <sub>1</sub>	8 dias sem irrigar				

\* ns: não significativo entre os tratamentos.

Em relação ao número de vagens por planta não foi possível observar diferença estatística entre os tratamentos segundo o teste de Tukey ao nível de 5% de significância, conforme visualizado na Tabela 11. Todavia observa-se uma tendência nos dados.

Os tratamentos 5, 9, 6 e 7 obtiveram os maiores resultados (Tabela 11). Todos os tratamentos receberam aplicação de prolina. Os tratamentos 5 e 9 tiveram acesso a 100% da evapotranspiração da cultura durante todo o ciclo. Os tratamentos 6 e 7 foram submetidos ao estresse hídrico em V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub>, respectivamente.

As menores médias foram encontradas nos tratamentos 10, 2, 3 e 4, onde em sua maioria (tratamentos 2, 3 e 4) não receberam aplicação de prolina e foram submetidos a estresse hídrico em V<sub>4</sub>, R<sub>1</sub> e V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub>, respectivamente. O tratamento 10 recebeu aplicação de prolina e foi submetido à falta de água em ambas as fases avaliadas (Tabela 11).

Em relação ao número de grãos por vagem, resultados apresentados na Tabela 11, não foi possível observar diferenças significativas em função da aplicação de prolina e submissão das plantas ao estresse hídrico.

De acordo com Navarro Júnior e Costa (2002) o número de grãos por vagem é o componente que apresenta a menor variação em cultivos, mesmo em diferentes situações. Tal característica é consequência do melhoramento genético na busca de plantas contendo vagens com uma melhor uniformidade de grãos.

O número de grãos por vagem é mais afetado quando a planta é submetida a uma situação de estresse do final do florescimento até o início do enchimento dos grãos (OYA et al., 2004; CHRISTMANN et al., 2007; FAROOQ et al., 2009; DARYANTO; WANG; JACINTHE, 2015). Neste trabalho, a submissão das plantas ao estresse hídrico foi realizada somente até o início do florescimento ( $R_1$ ).

Diversos estudos relacionando o *deficit* hídrico e componente de produção na cultura de soja, não observaram interações significativas entre estes fatores. Os resultados demonstram que o número de grãos por vagem está relacionado com a taxa de fertilização dos óvulos e que a deficiência hídrica não afeta significativamente este componente, estando o mesmo relacionado principalmente com o genótipo da planta (COMLEKCIOGLU; SIMSEK, 2011; FIOREZE et al., 2011; DEMIRTAŞ et al., 2010).

Para a massa de 1000 grãos de planta de soja não foram verificadas diferenças estatísticas entre os tratamentos (Tabela 11), todavia observa-se uma tendência de aumento da massa de grãos para os tratamentos que foram submetidos à deficiência hídrica no  $R_1$  e aplicação de prolina (tratamentos 8 e 10).

Corroborando com a tendência observada, Kuss et al. (2008) verificaram que a massa de grãos foi superior nos tratamentos que foram submetidos à deficiência hídrica durante o ciclo da cultura. Os autores argumentaram que os tratamentos que foram submetidos à falta de água, principalmente nos períodos de florescimento e final de enchimento de grãos, ocorreram um maior abortamento de flores e vagens e com isso as vagens que permaneceram na planta acumularam mais massa seca em seus grãos e conseqüentemente obtiveram um peso maior. Essas observações foram realizadas em comparação com as plantas que não sofreram com o estresse hídrico e obtiveram um maior número de vagens, que conseqüentemente demandaram mais fotoassimilados (KUSS et al., 2008).

Para Casagrande et al. (2001), este comportamento é considerado com um mecanismo de tolerância ao *deficit* hídrico, onde a planta direciona o fluxo de fotoassimilados para as vagens mais desenvolvidas, que, na teoria, teriam maiores chances de sucesso reprodutivo, ou seja, produzindo sementes mais viáveis.

Com relação à produtividade, mesmo os tratamentos não se diferenciando estatisticamente, a aplicação de prolina levou à resultados significativos no incremento da

produtividade (Tabela 11). No entanto, deve-se ressaltar que esses resultados foram colhidos em condições experimentais, provavelmente em áreas grandes, o efeito tenha menor expressão.

#### 4.1.7.2 Experimento II (campo)

Os componentes de produção número de nós da haste principal, distância do entrenó, número de vagens por planta de soja e produtividade de grãos de soja estão descritos na Tabela 12.

**Tabela 12. Número de nós da haste principal de plantas de soja (NNHP, nós haste<sup>-1</sup>), Distância do entrenó (DEN, cm), Número de vagens por planta de soja (Nvp, vagens planta<sup>-1</sup>) e Produtividade de grãos de soja (P, kg ha<sup>-1</sup>) na colheita nos diferentes tratamentos (Tr). Cultivar Brasmax-Extra-IPRO. Aplicação exógena de prolina (5 µM). Sorriso, MT. Safra 2021/2022. Experimento II: Campo. CV<sub>NNHP</sub>: 3,66; CV<sub>DEN</sub>: 5,05; CV<sub>Nvp</sub>: 3,74; CV<sub>P</sub>: 7,51.**

Tr	Descrição	NNHP <sub>ns</sub>	DEN <sub>ns</sub>	Nvp	P <sub>ns</sub>
1	Controle	17,70	4,56	42,99 <sub>BA</sub>	2388,38
2	Prolina. V <sub>4</sub> . Estresse a campo	17,72	4,64	42,13 <sub>B</sub>	2424,34
3	Prolina. R <sub>1</sub> . Estresse a campo	17,84	4,52	43,68 <sub>BA</sub>	2536,49
4	Prolina. V <sub>4</sub> e R <sub>1</sub> . Estresse a campo	18,19	4,49	46,43 <sub>A</sub>	2545,51

\*Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5% (p<0,05). ns: não significativo entre os tratamentos.

Mesmo não obtendo resultados estatisticamente diferentes em relação ao número de nós da haste principal observa-se maiores valores para as plantas que foram tratadas com o aminoácido prolina (Tabela 12). O tratamento 4 (aplicação em V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub>) obteve o maior número de nós, seguido dos tratamentos 3 (prolina em R<sub>1</sub>), 2 (prolina em V<sub>4</sub>) e o tratamento 1 (controle).

Essa característica influencia diretamente a produtividade pois, uma planta que apresenta um maior número de entrenós possui mais nós que conseqüentemente desenvolverão as estruturas reprodutivas (QUEIROZ-VOLTAN; FAHL; CARELLI, 2011).

Para a distância do entrenó (Tabela 12), resultados não significativos entre os tratamentos, obteve-se as maiores distâncias para os tratamentos 2 (prolina em V<sub>4</sub>) e 1

(controle), respectivamente. Os menores valores foram observados para o tratamento 4 (prolina em V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub>) seguido do tratamento 3 (prolina em R<sub>1</sub>) (Tabela 12).

O número de vagens por planta apresentou diferenças significativas segundo o teste estatístico utilizado (Tabela 12). O tratamento que recebeu aplicação de prolina nos estádios V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub> representou o maior número de vagens por planta (Tabela 12). Já o menor valor foi encontrado no tratamento 2 (aplicação de prolina em V<sub>4</sub>) seguido dos tratamentos 1 (controle) e 3 (aplicação de prolina em R<sub>1</sub>), ambos se apresentaram iguais estatisticamente.

Com base nos dados apresentados na Tabela 12, mesmo não sendo diferentes estatisticamente, é possível observar uma tendência das maiores produtividades nos tratamentos que foram submetidos a aplicação de prolina independente do estágio de aplicação, com destaque para o tratamento 4 (prolina em V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub>) com a maior média (2545,51 kg). Esse valor representa um ganho em produtividade de aproximadamente 6,58% (157,13 kg) comparado ao controle (2388,38 kg), equivalendo a aproximadamente 2,6 sacos por hectare.

É possível observar que o tratamento com a melhor média em produtividade (Tratamento 4: prolina V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub>) expressou um maior número de nós da haste principal (18,19), menor distância do entrenó (4,49) e um maior número de vagens por planta (46,43) (Tabela 12). Já os tratamentos com as menores produtividades (Tratamento 1: controle seguido do Tratamento 2: prolina em V<sub>4</sub>) apresentaram valores menores de número de nós da haste principal e número de vagens por planta e valores maiores da distância do entrenó (Tabela 12).

## 5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a aplicação de prolina, ao longo do ciclo da cultura (estádios fenológicos V<sub>4</sub> e R<sub>1</sub>), influenciou no melhor desenvolvimento radicular (casa-de-vegetação), massa de matéria seca da folha (casa-de-vegetação), massa de matéria seca de haste (casa-de-vegetação), altura de planta (campo), diâmetro de haste (casa-de-vegetação), índice de área foliar (casa-de-vegetação e campo), teor de prolina (casa-de-vegetação), e componentes de produção (número de vagens por planta - campo), bem como apresentou uma tendência de aumento de produtividade de grãos de soja (casa-de-vegetação e campo).



## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, G.M. **Aspectos fisiológicos, anatômicos e produtivos em plantas de soja sob duas condições de irradiância e umidade do solo**. 2019. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 2019.
- ANAPALLI, S.S.; FISHER, D.K.; REDDY, K.N.; WAGLE, P.; GOWDA, P.H.; SUI, R. Quantifying soybean evapotranspiration using an eddy covariance approach. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v.209, p.228-239, 2018. Elsevier BV.
- ANDERSON, M.D.; PRASAD, T.K.; STEWART, C.R. Changes in isozyme profiles of catalase, peroxidase, and glutathione reductase during acclimation to chilling in mesocotylus of maize seedlings. **Plant Physiology**, Washington, v.109, p.1247-1257, 1995.
- ARTEAGA, S.; YABOR, L.; DÍEZ, M.J; PROHENS, J.; BOSCAIU, M.; VICENTE, O. The use of proline in screening for tolerance to drought and salinity in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. **Agronomy**, [s.l.], v.10, n.6, p.817, 2020. MDPI AG.
- BALBINOT JÚNIOR, A.A.; FERREIRA, A.A.; WERNER, F.; AGUIAR E SILVA, M.A.; ZUCARELI, C. **Índice de área foliar da soja em função da redução da densidade de semeadura**. Embrapa, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n.17, 2018.
- BATES, L.; WALDREN, R.P.; TEARE, I.D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant Soil**, The Hague, v.39, p.205-207, 1973.
- BERGAMASCHI, H. FOTOPERIODISMO. UFRGS. 2007.
- BIANCUCCI, M.; MATTIOLI, R.; MOUBAYIDIN, L.; SABATINI, S.; COSTANTINO, P.; TROVATO, M. Proline affects the size of the root meristematic zone in Arabidopsis. **BMC Plant Biology**, v.15, p.263. 2015.
- BLUM, A. Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production. **Plant, Cell and Environmental**, p.1-7, 2016.
- BOARD, J.E.; HARVILLE, B.G. Explanations for greater light interception in narrow vs. Wide-row. **Crop Science**, v.32, p.198-202, 1992.
- BOARD, J.E.; MODALI, H. Dry matter accumulation predictors for optimal yield in soybean. **Crop Science**, Madison, v.45, p.1790-1799, 2005.
- BOKSZCZANIN, K.L.; FRAGKOSTEFANAKIS, S.; BOSTAN, H.; BOVY, A.; CHATURVEDI, P.; CHIUSANO, M.L.; LI, H. Perspectives on deciphering mechanisms underlying plant heat stress response and thermotolerance. **Frontiers in plant science**, v.4, p.315, 2013.
- BONATO, E.R. **Estresse em soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 254p.

BOOTE, K.J.; ALLEN, L.H.; PRASAD, P.V.; BAKER, J.T.; GESCH, R.W.; SNYDER, A.M.; THOMAS, J.M. Elevated temperature and CO<sub>2</sub> impacts on pollination, reproductive growth, and yield of several globally important crops. **Journal of Agricultural Meteorology**, v.60, n.5, p.469-474, 2005.

BUEZO, J.; SANZ-SAEZ, Á.; MORAN, J.F.; SOBA, D.; ARANJUELO, I.; ESTEBAN, R. Drought tolerance response of high-yielding soybean varieties to mild drought: physiological and photochemical adjustments. **Physiologia Plantarum**: Hoboken, n.166, v.1, p.88-104, 2019.

CAKMAK, I.; HORST, W.J. Effect of aluminum on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v.83, p.463-468, 1991.

CÂMARA, G.M.S. Fisiologia da produção de soja. Soja & Cia, Piracicaba: EdUSP, 2009. p.150-177.

CÂMARA, G.M.S. **Introdução ao agronegócio de soja**: origem e difusão geográfica. Origem e difusão geográfica. Departamento de Produção Vegetal da Universidade de São Paulo: Esalq, 2015.

CARMO-SILVA, A.E.; GORE, M.A.; ANDRADE-SANCHEZ, P.; FRENCH, A.N.; HUNSAKER, D.J.; SALVUCCI, M.E. Decreased CO<sub>2</sub> availability and inactivation of Rubisco limit photosynthesis in cotton plants under heat and drought stress in the field. **Environmental and Experimental Botany**, v.83, p.1-11, 2012.

CARNEIRO, M.M.L.C. **Trocas gasosas e metabolismo antioxidativo em plantas de girassol em resposta ao deficit hídrico**. 2001. 43p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia vegetal) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2011.

CARVALHO, I.R.; KORCELSKI, C.; PELISSARI, G.; DALMIR, A.; ROSA, G.M. Demanda hídrica das culturas de interesse agrônômico. Enciclopédia Biosfera, v.9, n.17, p.969-985, 2013.

CASAGRANDE, E.C.; FARIAS, J.R.B.; NEUMAIER, N.; OYA, T.; PEDROSO, J.; MARTINS, P.K.; BRETON, M.C.; NEPOMUCENO, A.L. Expressão gênica diferencial durante deficit hídrico em soja. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Lavras, v.13, n.2, p.168-184, 2001.

CASTRO, J.N.; MÜLLER, C.; ALMEIDA, G.M.; COSTA, A.C. Physiological tolerance to drought under high temperature in soybean cultivars. **Australian Journal of Crop Science**, v.13, p.976-987, 2019.

CASTRO, P.R.C.; CARVALHO, M.E.A. **Aminoácidos e suas aplicações na agricultura**. Piracicaba: Esalq, 2014. 60p. (Série Produtor Rural, 57).

CATUCHI, T.A.; VÍTOLO, H.F.; BERTOLLI, S.C.; SOUZA, G.M. Tolerance to water deficiency between two soybean cultivars: transgenic versus conventional. **Ciência Rural**, v.41, p.373-378, 2011.

CHANG, J. H. **Climate and agriculture and ecological survey**. Chicado: Transactions Publishers. 1974. 304p.

- CHRISTMANN, A.; WEILER, E.W.; STEUDLE, E.; GRILL, E. A hydraulic signal in root-to-shoot signalling of water shortage. **The Plant Journal**: London, v.52, n.1, p.167-174, 2007.
- COMLEKCIOGLU, N.; SIMSEK, M. Effects of deficit irrigation on yield and yield components of vegetable soybean (*Glycine max* L. (Merr.)) in semi-arid conditions. **African Journal of Biotechnology**, Nairobi, v.10, n.33, p.6227-6234, 2011.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira. Boletim da safra de grãos: 6º levantamento – safra 2020/21. Conab, 2021.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira. Boletim da safra de grãos**. Safra 2021/2022, n.12 - Décimo segundo levantamento, Conab, Brasília, v.9. p.1-88, 2022.
- CUELLAR-ORTIZ, S.M.; ARRIETA-MONTIEL, M.P.; ACOSTA-GALLEGOS, J.; COVARRUBIAS, A.A. Relationship between carbohydrate partitioning and drought resistance in common bean. **Plant, Cell and Environment**, v.31, p.1399-1409, 2008.
- CUI, Y.; JIANG, S.; JIN, J.; NING, S.; FENG, P. Quantitative assessment of soybean drought loss sensitivity at different growth stages based on S-shaped damage curve. **Agricultural Water Management**: Amsterdam, v.213, n.3, p.821-832, 2019.
- CUNHA, G.R.; BARNI, N.A.; HAAS, J.C.; MALUF, J.R.T.; MATZENAUER, R.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M.B.M.; PIRES, J.L.F. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.3, p.446-459, 2001.
- CURTT, F.F. **Estimativa de área foliar na cultura de soja usando os métodos de dimensões foliares e imagens digitais**. 2019. 33 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2019.
- DALLAGNOL, L.J.; RODRIGUES, F.A.; DAMATTA, F.M.; MIELLI, M.V.B.; PEREIRA, S.C. Deficiency in silicon uptake affects cytological, physiological, and biochemical events in the rice-Bipolaris oryzae interaction. **Phytopathology**, v.101, p.92-104, 2011.
- DARYANTO, S.; WANG, L.; JACINTHE, P.A. Global synthesis of drought effects on food legume production. **PLOS ONE**: San Francisco, v.10, n.6, p.1-16, 2015.
- DELATORRE-HERRERA, J.; DELFINO, I.; SALINAS, C.; SILVA, H.; CARDEMIL, L. Irrigation restriction effects on water use efficiency and osmotic adjustment in Aloe Vera plants (*Aloe barbadensis* Miller). **Agricultural Water Management**, v.97, p.1564-1570, 2010.
- DEMIRTAŞ, Ç.; YAZGAN, S.; CANDOGAN, B.N.; SINCİK, M.; BUYUKCANGAZ, H.; GOKSOY, A.T. Quality and yield response of soybean (*Glycine max* L. Merril) to drought stress in sub-humid environment. **African Journal of Biotechnology**, Nairobi, v.9, n.41, p.6873-6881, 2010.

DJANAGUIRAMAN, M.; BOYLE, D.L.; WELTI, R.; JAGADISH, S.V.K.; PRASAD, P.V.V. Decreased photosynthetic rate under high temperature in wheat is due to lipid desaturation, oxidation, acylation, and damage of organelles. **BMC Plant Biology**, v.18, n.1, p.1-17, 2018.

DJANAGUIRAMAN, M.; NARAYANAN, S.; ERDAYANI, E.; PRASAD, P.V. Effects of high temperature stress during anthesis and grain filling periods on photosynthesis, lipids and grain yield in wheat. **BMC Plant Biology**, v.20, n.1, p.1-12, 2020.

DUARTE, D.M.; SILVA, D.C.; ROCHA, E.C.; PEREIRA, H.S.; RODRIGUES, F. Simulação de deficit hídrico em diferentes genótipos de feijão pela diminuição do potencial osmótico. **Revista Processos Químicos**, Anápolis, v.13, p.35-41, 2013.

DUBEY, A.; KUMAR, A.; ABDALLAH, E.F.; HASHEM, A.; KHAN, M.L. Growing more with less: Breeding and developing drought resilient soybean to improve food security. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v.105, n.10, p.425-437, 2019.

DWIVEDI, S.K.; ARORA, A.; SINGH, V.P.; SINGH, G.P. Induction of water deficit tolerance in wheat due to exogenous application of plant growth regulators: membrane stability, water relations and photosynthesis. **Photosynthetica**, v.56, n.2, p.478-486, 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Centro Nacional de Pesquisa de Soja, Tecnologias de Produção de Soja - Paraná 2004**. Londrina: Embrapa Soja, 218p. 2003.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Circular Técnica, 48: Ecofisiologia de soja**. Londrina, 2007. 9p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistemas de produção tecnologias de produção de soja - Região Central do Brasil 2011**. Londrina, Embrapa Soja, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Tecnologias de produção de Soja - Região Central do Brasil 2012 e 2013**. Londrina: Embrapa Soja, 2011, 264p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema de produção: Tecnologias de Produção de Soja**. Londrina, Embrapa Soja, 2013a. 266p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Tecnologias de produção de Soja - Região Central do Brasil 2014**. Londrina, Embrapa Soja, 265p. 2013b.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 14: Arquitetura e pilosidade da raiz de soja em casa-de-vegetação**. Brasília, 2018. 25p.

ERNST, W.H.O.; NELISSEN, H.J.M.; BOOKUM, W.M.T. Combination toxicology of metal-enriched soils: physiological responses of a Zn- and Cd-resistant ecotype of *Silene vulgaris* on polymetallic soils. **Environmental and Experimental Botany**, Philadelphia, v.43, n.1, p.55-71, 2000.

FAHAD, S.; BAJWA, A.A.; NAZIR, U.; ANJUM, S.A.; FAROOQ, A.; ZOHAIB, A.; SADIA, S.; NASIM, W.; ADKINS, S.; SAUD, S.; IHSAN, M.Z.; ALHARBY, H.; WU, C.;

- WANG, D.; HUANG, J. Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. **Frontiers in Plant Science**, v.8, p.1147, 2017.
- FARIAS, J.R.B; NEUMAIER, N; NEPOMUCENO, A.L. Soja. Agrometeorologia dos cultivos. Brasília, INMET, p.261-277, 2009.
- FAROOQ, M.; WAHID, A.; KOBAYASHI, N.; FUJITA, D.; BASRA, S.M.A. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Agronomy for Sustainable Development**: Berlin, v.29, n.1, p.185-212, 2009.
- FELLER, U. Drought stress and carbon assimilation in a warming climate: reversible and irreversible impacts. **Journal Plant Physiology**, 2016.
- FERRAZ, R.L.S.; MELO, A.S.; SUASSUNA, J.F.; BRITO, M.E.B.; FERNANDES, P.D.; NUNES JÚNIOR, E.S. Trocas gasosas e eficiência fotossintética em ecótipos de feijoeiro cultivados no semiárido. Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia, v.42, n.2, p.181-188, 2012.
- FIGUEIREDO, S.L.; PIVETTA, L.G.; FANO, A.; MACHADO, F.R.; GUIMARÃES, V.F. Comportamento de genótipos de soja submetidos a déficit hídrico intenso em casa-de-vegetação. **Revista Ceres**, Viçosa, v.58, n.3, p.342-349, 2011.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Countries by commodity. FAO, 2016. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/437/default.aspx>>. Acesso em: 26 mai. 2018.
- FORDE, B.G.; CUTLER, S.R.; ZAMAN, N.; KRYSAN, P.J. Glutamate signalling via a MEKK1 kinase-dependent pathway induces changes in Arabidopsis root architecture. **Plant Journal**, v.75, p.1-10. 2013.
- FRANÇA NETO, J.B.; KRZYŻANOWSKI, F.C.; HENNING, A.A.; PÁDUA, G.P.; LORINI, I.; HENNING, F.A. Embrapa Soja (Org.). Tecnologia da produção de semente de soja de alta qualidade: a importância da utilização de sementes de soja de alta qualidade. Londrina, 2016. 84p.
- FRANÇA NETO, J.B.; KRZYŻANOWSKI, F.C.; HENNING, A.A.; WEST, S.H.; MIRANDA, L.C. Soybean seed quality as affected by shriveling due to heat and drought stresses during seed filling. **Seed Science and Technology**, v.21, n.1, p.107-116, 1993.
- FRANÇA NETO, J.B.; PÁDUA, G.P.; KRZYŻANOWSKI, F.C. Semente esverdeada de soja: causas e efeitos sobre o desempenho fisiológico - Série Sementes. Londrina: Embrapa Soja, 2012. (Embrapa Soja, Circular Técnica, 91).
- FU, Y.; MA, H.; CHEN, S.; GU, T.; GONG, J. Control of proline accumulation under drought via a novel pathway comprising the histone methylase CAU1 and the transcription factor ANAC055. **Journal of Experimental Botany**, v.69, p.579-588, 2018.
- GAVA, R. Os efeitos do estresse hídrico na cultura de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). 2014. 123f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

GERGANOVA, M.; POPOVA, A.V.; STANOEVA, D.; VELITCHKOVA, M. Tomato plants acclimate better to elevated temperature and high light than to treatment with each factor separately. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.104, p.234-241, 2016.

GONÇALVES, J.G.R. **Identificação de linhagens de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) tolerantes à seca**. 2013. 82p. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2013.

HA, C.V.; WATANABE, Y.; TRAN, U.T.; LE, D.T.; TANAKA, M.; NGUYEN, K.H.; SEKI, M.; VAN NGUYEN, D.; TRAN, L.S.P. Comparative analysis of root transcriptomes from two contrasting drought- responsive Williams 82 and DT2008 soybean cultivars under normal and dehydration conditions. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v.6, n.551. p.1-12, 2015.

HALLIWELL, B.; GUTTERIDGE, J.M.C. **Free Radicals in Biology and Medicine**, 4 ed., Oxford: Clarendon Press, 2006.

HANNICKEL, A.; PRADO DA SILVA, M.H.; LINS DE BARROS, H.; ALBUQUERQUE, M.P. Image J como ferramenta para medida da área de partículas de magnetita em três escalas manométricas. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v.29, p.16-26, 2012.

HAQUE, M.Z.; KOBAYASHI, M.; FUJII, K.; TAKAHASHI, E. The incorporation of aminoacids and nucleic acid bases into the seedling, reproductive stage and young ear portion of rice plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.34, p.17-24, 1971.  
<https://www.jstor.org/stable/42933140>.

HARSH, A.; SHARMA, Y.K.; JOSHI, U.; RAMPURIA, S.; SINGH, G.; KUMAR, S.; SHARMA, R. Effect of short-term heat stress on total sugars, proline and some antioxidant enzymes in moth bean (*Vigna conitifolia*). **Annals of Agricultural Sciences**, v.61, n.1, p.57-64, 2016.

HASANUZZAMAN, M.; NAHAR, K.; ALAM, M.; ROYCHOWDHURY, R.; FUJITA, M. Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of heat stress tolerance in plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v.14, n.5, p.9643-9684, 2013.

HATZIG, S.; ZAHARIA, L.I.; ABRAMS, S.; HOHMANN, M.; LEGOAHEC, L.; BOUCHEREAU, A.; NESI, N.; SNOWDON, R.J. Early osmotic adjustment responses in drought resistant and drought-sensitive oilseed rape. **Journal of Integrative Plant Biology**, v.56, p.797-809, 2014.

HAWORTH, M.; MARINO, G.; BRUNETTI, C.; KILLI, D.; DE CARLO, A.; CENTRITTO, M. The impact of heat stress and water deficit on the photosynthetic and stomatal physiology of olive (*Olea europaea* L.) - A Case Study of the 2017 Heat Wave. **Plants**, v.7, n.4, p.76, 2018.

HAYAT, S.; HAYAT, Q.; ALYEMENI, M.N.; WANI, A.S.; PICHTEL, J.; AHMAD, A. Role of proline under changing environments. **Plant Signaling & Behavior**, [s.l.], v.7, n.11, p.1456-1466, 2012.

HE, M.; HE, C.Q.; DING, N.Z. Abiotic stresses: General defenses of land plants and chances for engineering multistress tolerance. **Frontiers in Plant Science**, 2018, v.9, p.1771.

- HEINEMANN, A.B.; MAIA, A.H.N.; DOURADO NETO, D.; INGRAM, K.T.; HOOGENBOOM, G. Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) growth and development response to CO<sub>2</sub> enrichment under different temperature regimes. **European Journal of Agronomy**, v.24, p.52-61, 2006.
- HOQUE, M.A.; OKUMA, E.; BANU, M.N.A.; NAKAMURA, K.; SHIMOISHI, Y.; MURATA, Y. Exogenous proline mitigates the detrimental effects of salt stress more than exogenous betaine by increasing antioxidant enzyme activities. **Journal of Plant Physiology**, v.164, n.5, p.553-561, 2007.
- HOSSAIN, M.A.; HASANUZZAMAN, M.; FUJITA, M. Coordinate induction of antioxidant defense and glyoxalase system by exogenous proline and glycine betaine is correlated with salt tolerance in mung bean. **Frontiers of Agriculture in China**, [s.l.], v.5, n.1, p.1-14, 2011.
- HOSSAIN, M.M.; LAM, H.M.; ZHANG, J. Responses in gas exchange and water status between drought-tolerant and -susceptible soybean genotypes with ABA application. **The Crop Journal**, Beijing, v.3, n.6, p.500-506, 2015.
- HOSSAIN, M.M.; LIU, X.; QI, X.; LAM, H.M.; ZHANG, J. Differences between soybean genotypes in physiological response to sequential soil drying and rewetting, **The Crop Journal**: Beijing, v.2, n.6, p.1-15, 2014.
- HUANG, B.R.; FU, J. Photosynthesis, respiration, and carbon allocation of two cool season perennial grasses in response to surface soil drying, **Plant Soil**, p.17-26, 2000.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for policymakers. In: SOLOON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; M. TIGNOR, M.; MILLER, H.L. (Ed.). *Climate Change 2007: the physical science basis*. Cambridge: IPCC: Cambridge University Press, 2007.
- JALEEL, C.A.; MANIVANNAN, P.; KISHOREKUMAR, A.; SANKAR, B.; GOPI, R.; SOMASUNDARAM, R.; PANNEERSELVAM, R. Alterations in osmoregulation's, antioxidant enzymes and indole alkaloid levels in *Catharanthus roseus* exposed to water deficit. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v.59, p.150-157, 2007.
- JALEEL, C.A.; MANIVANNAN, P.; WAHID, A.; FAROOQ, M.; AL-JUBURI, H.J.; SOMASUNDARAM, R.; PANNEERSELVAM, R. Drought stress in plants: A review on morphological characteristics and pigments composition. **International Journal of Agriculture and Biology**, Faisalabad, v.11, n.1, p.100-105, 2009a.
- JALEEL, C.A.; RIADH, K.; GOPI, R.; MANIVANNAN, P.; INES, J.; AL-JUBURI, H.J.; CHANG-XING, Z.; BO-HONG, S.; PANNEERSELVAM, R. Antioxidant defense responses: physiological plasticity in higher plants under abiotic constraints. **Acta Physiologiae Plantarum**. v.31, p.427-436, 2009b.
- JANGRA, S.; MISHRA, A.; KAMBOJ, D.; YADAV, N.R.; YADAV, R.C. Engineering abiotic stress tolerance traits for mitigating climate change. **Plant Biotechnology: Recent Advancements and Developments**, p.59-73, 2017.

JEONG, J.S.; KIM, Y.S.; BAEK, K.H.; JUNG, H.; HA, S.H.; DO CHOI, Y.; KIM, M.; REUZEAU, C.; KIM, J.K. Root-specific expression of OsNAC10 improves drought tolerance and grain yield in rice under field drought conditions. **Plant Physiology**, v.153, p.185-197, 2010.

JEONG, J.S.; KIM, Y.S.; REDILLAS, M.C.; JANG, G.; JUNG, H.; BANG, S.W.; CHOI, Y.D.; HA, S.H.; REUZEAU, C.; KIM, J.K. OsNAC5 overexpression enlarges root diameter in rice plants leading to enhanced drought tolerance and increased grain yield in the field. **Plant Biotechnology Journal**, v.11, p.101-114, 2013.

JIMÉNEZ, A.; HERNÁNDEZ, J.A.; PASTORI, G.; DEL RIO, L.A.; SEVILLA, F. Role of ascorbate-glutathione cycle of mitochondria and peroxisomes in the senescence of pea leaves. **Plant Physiology**, Washington, v.118, p.1327-1335, 1998.

JIMÉNEZ, S.; DRIDI, J.; GUTIÉRREZ, D.; MORET, D.; IRIGOYEN, J.J.; MORENO, A.A.; GOGORCENA, Y. Physiological, biochemical and molecular responses in four *Prunus* rootstocks submitted to drought stress. **Tree physiology**, [s.l.], v.33, p.1061-1075. 2013.

JUMRANI, K.; BHATIA, V.S. Identification of drought tolerant genotypes using physiological traits in soybean. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, New Delhi, v.25, n.3, p.697-711, 2019a.

JUMRANI, K.; BHATIA, V.S. Interactive effect of temperature and water stress on physiological and biochemical processes in soybean. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, New Delhi, v.25, n.3, p.667-681, abr. 2019a.

KAHLAOUI, B.; HACHICHA, M.; MISLE, E.; FIDALGO, F.; TEIXEIRA, J. Physiological and biochemical responses to the exogenous application of proline of tomato plants irrigated with saline water. **Journal of The Saudi Society of Agricultural Sciences**, [s.l.], v.17, n.1, p.17-23, 2015.

KALAJI, H.M.; JAJOO, A.; OUKARROUM, A.; BRESTIC, M.; ZIVCAK, M.; SAMBORSKA, I.A.; LADLE, R.J. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.38, n.4, p.102, 2016.

KOFFLER, B.E.; LUSCHIN-EBENGREUTH, N.; STABENTHEINER, E.; MÜLLER, M.; ZECHMANN, B. Compartment specific response of antioxidants to drought stress in *Arabidopsis*. **Plant Science**, v.227, p.133-144, 2014.

KUNERT, K.J.; VORSTER, B.J.; FENTA, B.A.; KIBIDO, T.; DIONISIO, G.; FOYER, C.H. Drought stress responses in soybean roots and nodules. **Frontiers in Plant Science**, v.7, p.1015, 2016.

KUSS, R.C.R.; KÔNIG, O.; DUTRA, L.M.C.; BELLÉ, R.A.; ROGGIA, S.; STURMER, G.R. Populações de plantas e estratégias de manejo de irrigação na cultura de soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.4, p.1133-1137, 2008.

LARCHER, W. *Ecofisiologia vegetal*. Tradução de C.H.B.A. Prado. São Carlos: RIMA Artes e Textos, 2000. 531p. **Plant Ecophysiology**. São Carlos: RIMA Artes e Textos, 2006. 531p.

LEE, D.K.; CHUNG, P.J.; JEONG, J.S.; JANG, G.; BANG, S.W.; JUNG, H.; KIM, Y.S.; HA, S.H.; CHOI, Y.D.; KIM J.K. The rice OsNAC6 transcription factor orchestrates multiple molecular mechanisms involving root structural adaptations and nicotianamine biosynthesis for drought tolerance. **Plant Biotechnology Journal**, v.15, p.754-764, 2017.

LEEMHUIS, J.A.F. Root development under drought stress. **Technology and Knowledge Transfer e-Bulletin**, v.2, n.6, 2011.

LESSIN, R.C.; GHINI, R. Efeito do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico sobre o oídio e o crescimento de plantas de soja. **Tropical Plant Pathology**, [s.l.], v.34, n.6, p.385-392, 2009.

LI, Y.; LI, H.; LI, Y.; ZHANG, S. Improving water-use efficiency by decreasing stomatal conductance and transpiration rate to maintain higher ear photosynthetic rate in drought-resistant wheat. **The Crop Journal**, v.5, n.3, p.231-239, 2017.

LIVINE, A.; VAADIA, Y. Water deficits and hormones relations In: KOZLOWSKI (Ed.). Water deficits and plant growth. Wisconsin, 1972. v.3, p.258-273.

LOBATO, A.K.S.; OLIVEIRA NETO, C.F.; SANTOS FILHO, B.G.; COSTA, R.C.L.; CRUZ, F.J.R.; NEVES, H.K.B.; LOPES, M.J.S. Physiological and biochemical behavior in soybean (*Glycine max* cv. Sambaiba) plants under water deficit. **Australian Journal of Crop Science**, Amsterdam, v.2, n.1, p.25-32, 2008.

MACHADO-JÚNIOR, C.S. Déficit hídrico em tipos de crescimento da soja. 56 f. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia, 2015.

MARIJUAN, M.P.; BOSCH, S.M. Ecophysiology of invasive plants: osmotic adjustment and antioxidants. **Trends in Plant Science**, v.18, p.660-666, 2013.

MASOUMI, H.; DARVISH, F.; DANESHIAN, J.; NOURMOHAMMADI, G.; HABIBI, D. Chemical and biochemical responses of soybean (*Glycine max* L.) cultivars to water deficit stress. **Australian Journal of Crop Science**, [s.l.], p.544-553, 2011.

MATHOBO, R.; MARAIS, D.; STEYN, J.M. The effect of drought stress on yield, leaf gaseous exchange and chlorophyll fluorescence of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Agricultural Water Management**, v.180, p.118-125, 2017.

MATHUR, S.; AGRAWAL, D.; JAJOO, A. Photosynthesis: response to high temperature stress. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v.137, p.116-126, 2014.

MATYSIK, J.; ALIA, A.; BHALU, B.; MOHANTY, P. Molecular mechanisms of quenching of reactive oxygen species by proline under stress in plants. **Current Science**, Bangalore, v.82, p.525-532, 2002.

MEDEIROS, J.F.; SIMÕES, A.N.; ALVES, L.P.; COSTA, M.C.; SCALOPPI, E.J.; MENEZES, J.B. Qualidade de melão amarelo cultivar 'Gold Mine' submetido a diferentes lâminas de irrigação e dois níveis de salinidade. **Horticultura Brasileira**, v.18, p.614-615, 2000.

- MEIRELES, A.C.M.; ANDRADE, E.M.; CHAVES, L.C.G.; FRISCHKORN, H.; CRISOSTOMO, L.A. A new proposal of the classification of irrigation water. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.41, n.3, p.349-357, 2010.
- MESQUITA, R.O. Determinantes fisiológicos e moleculares da resposta diferencial à seca em soja. Tese, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 143p. 2013.
- MIRZAI, M.; MOEINI, A.; GHANATI, F. Effects of drought stress on the lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in two canola (*Brassica napus* L.) cultivars. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v.15, p.593-602 .2013.
- MISHRA, S.; DUBEY, R.S. Inhibition of ribonuclease and protease activities in arsenic exposed rice seedlings: role of proline as enzyme protectant. **Journal of Plant Physiology**, Baltimore, v.163, p.927-936, 2006.
- MOHAMED, H.I.; LATIF, H.H. Improvement of drought tolerance of soybean plants by using methyl jasmonate. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v.23, n.3, p.545-556, 2017.
- MORAES, R.M.; KLUMP, A.; FURLAN, C.M.; KLUMP, G.; DOMINGOS, M.; RINALDI, M.C.S.; MODESTO, I.F. Tropical fruit trees as bioindicator of industrial air pollution in Southeast Brazil. **Environment International**, Holland, v.28, p.367-374, 2002.
- MOUSSA, H.R.; ABDEL-AZIZ, S.M. Comparative response of drought tolerant and drought sensitive maize genotypes to water stress. **Australian Journal of Crop Science**, [s.l.], p.31-36, 2008.
- MUNDSTOCK, C.M.; THOMAS, A.L. Soja: fatores que afetam o crescimento e rendimento de grãos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 31p.
- MWENYE, O.J.; VAN RENSBURG, L.; VAN BILJON, A.; MERWE, R.V.D. The role of proline and root traits on selection for drought-stress tolerance in soybeans: a review. **South African Journal of Plant and Soil**, [s.l.], v.33, n.4, p.245-256, 2016.
- NAHAR, K.; HASANUZZAMAN, M.; ALAM, M.; FUJITA, M. Glutathione-induced drought stress tolerance in mung bean: coordinated roles of the antioxidant defence and methylglyoxal detoxification systems. **AOB Plants**, p.1-18, 2015.
- NAVARRO JÚNIOR, H.M.; COSTA, J.A. Contribuição relativa dos componentes do rendimento para a produção de grãos em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.3, p.269-274, 2002.
- NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L.; FARIAS, J.R.B.; OYA, T. Estresses de ordem ecofisiológica. In: BONATO, E.R. (Ed.). **Estresses em soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. Cap. 2. p.45-65.
- NIU, Y.; XIANG, Y. An overview of biomembrane functions in plant responses to high-temperature stress. **Frontiers in Plant Science**, v.9, p.915, 2018.

NUNES, J.L.S. **Características de soja (*Glycine max*)**. 2016. Publicada pela Agrolink.

Disponível em:

[https://www.agrolink.com.br/culturas/soja/informacoes/caracteristicas\\_361509.html](https://www.agrolink.com.br/culturas/soja/informacoes/caracteristicas_361509.html). Acesso em: 13 abr. 2020.

OHASHI, Y.; NAKAYAMA, N.; SANEOKA, H.; FUJITA, K. Effects of drought stress on photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and stem diameter of soybean plants. **Biologia Plantarum**, v.50, p.138-141, 2006.

OSMOLOVSKAYA, N.; SHUMILINA, J.; KIM, A.; DIDIO, A.; GRISHINA, T.; BILOVA, T.; KELTSIEVA, O.A.; ZHUKOV, V.; TIKHONOVICH, I.; TARAKHOVSKAYA, E.; FROLOV, A.; WESSJOHANN, L. Methodology of drought stress research: experimental setup and physiological characterization. **International Journal of Molecular Sciences**, v.19, p.4089, 2018.

OUGHAM, H.; THOMAS, H.; ARCHETTI, M. The adaptive value of leaf colour. **New Phytologist**, p.9-13, 2008.

OYA, T.; NEPOMUCENO, A.L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J.R.B.; TOBITA, S.; ITO, O. Drought tolerance characteristics of Brazilian soybean cultivars: evaluation and characterization of drought tolerance of various Brazilian soybean cultivars in the field. **Plant Production Science: Tokyo**, v.7, n.2, p.129-137, 2004.

OZDEN, M.; DEMIREL, U.; KAHRAMAN, A. Effects of proline on antioxidant system in leaves of grapevine (*Vitis vinifera* L.) exposed to oxidative stress by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. **Scientia Horticulturae**, v.119, p.163-168, 2009.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [AMBRIZZI, T.; ARAUJO, M. (Ed.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 464p. 2014. ISBN: 978-85-285-0207-7.

PALHARINI, W.G. **Influência do estresse hídrico sobre caracteres agrônômicos, fisiológicos e abertura de vagens imaturas em soja**. 2016. 44f. Tese (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

PASSARDI, F.; COSIO, C.; PENEL, C.; DUNAND, C. Peroxidases have more functions than a Swiss army knife. **Plant Cell Reports**, Berlin, v.24, p.255-265, 2005.

PEDROL, N.; RAMOS, P.; REIGOSA, M.J. Phenotypic plasticity and acclimation to water deficits in velvet-grass: a long-term greenhouse experiment. Changes in leaf morphology, photosynthesis and stress-induced metabolites. **Journal of Plant Physiology: Amsterdam**, v.157, n.3, p.383-393, out. 2000.

PEREIRA, S.G.F. Alterações em plantas de soja sob déficit hídrico no Estádio reprodutivo. 58 f. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia - Produção Vegetal) - Universidade Federal de Viçosa, Instituto de Ciências Agrárias, UFV, Viçosa, 2017.

- PESKE, S.T.; BARROS, A.C.S.A. Produção de Sementes. In: PESKE, S.T.; ROSENTHAL, M.D.; ROTA, G.R.M. (Ed.). **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos**. Pelotas: Editora RS, Cap. 1. p.12-91, 2003.
- PINTO, H.S.; ASSAD, E.D. Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil. Campinas, 84p. 2008.
- PITTERMANN, J. The evolution of water transport in plants: an integrated approach. **Geobiology**, v.8, n.2, p.112-139, 2010.
- PORCEL, R.; RUIZ-LOZANO, J.M. Arbuscular mycorrhizal influence on leaf water potential, solute accumulation, and oxidative stress in soybean plants subjected to drought stress. **Journal of Experimental Botany**, v.55, p.1743-1750, 2004.
- PRADHAN, G.; PRASAD, P.V.V.; FRITZ, A.K.; KIRKHAM, M.B.; GILL, B.S. Effects of drought and high temperature stress on synthetic hexaploid wheat. **Functional Plant Biology**, v.39, p.190-198, 2012.
- QASEEM, M.F.; QURESHI, R.; MUQADDASI, Q.H.; SHAHEEN, H.; KOUSAR, R.; RÖDER, M.S. Genome-wide association mapping in bread wheat subjected to independent and combined high temperature and drought stress. **PloS One**, v.13, n.6, 2018.
- QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; FAHL, J.I.; CARELLI, M.L.C. Diferenciação floral em cafeeiro arábica (*Coffea arabica* L.) sob diferentes níveis de radiação. **Coffee Science**, v.6, n.3, p.256-268, 2011.
- REDILLAS, M.C.; JEONG, J.S.; KIM, Y.S.; JUNG, H.; BANG, S.W.; CHOI, Y.D.; HA, S.H.; REUZEAU, C.; KIM, J.K. The overexpression of OsNAC9 alters the root architecture of rice plants enhancing drought resistance and grain yield under field conditions. **Plant Biotechnology Journal**, v.10, p.792-805, 2012.
- RICH, S.M.; WATT, M. Soil conditions and cereal root system architecture: review and considerations for linking Darwin and Weaver. **Journal of Experimental Botany**, v.64, n.5, p.1193-1208, 2013.
- RUIZ-VERA, U.M.; SIEBERS, M.; GRAY, S.B.; DRAG, D.W.; ROSENTHAL, D.M.; KIMBALL, B.A.; BERNACCHI, C.J. Global warming can negate the expected CO<sub>2</sub> stimulation in photosynthesis and productivity for soybean grown in the Midwestern United States. **Plant Physiology**, v.162, v.1, p.410-423, 2013.
- SAHOO, R.N.; RAY, S.S.; MANJUNATH, K.R. Hyperspectral remote sensing of agriculture. **Current Science**, Bangalore, v.108, n.5, 2015.
- SCANDALIOS, J.G. Oxidative stress: molecular perception and transduction of signals triggering antioxidant gene defenses. **Brazilian Journal of Medical and Biological Research**, v.38, p.995-1014, 2005.
- SCHULTEN, H.R.; SCHNITZER, M. The chemistry of soil organic nitrogen: a review. **Biology and Fertility of Soils**, [s.l.], v.26, n.1, p.1-15, 1997.

- SEHGAL, A.; SITA, K.; SIDDIQUE, K.H.; KUMAR, R.; BHOGIREDDY, S.; VARSHNEY, R.K.; NAYYAR, H. Drought or/and heat-stress effects on seed filling in food crops: impacts on functional biochemistry, seed yields, and nutritional quality. **Frontiers in Plant Science**, v.9, p.1705, 2018.
- SENTELHAS, P.C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G.M.S.; FARIAS, J.R.B.; HAMPF, A.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil - magnitude, causes and possible solutions for a sustainable production. **Journal of Agriculture Science**, v.153, p.1394-1411, 2015.
- SETIYONO, T. D. et al. UNDERSTANDING AND MODELING THE EFFECT OF TEMPERATURE AND DAYLENGTH ON SOYBEAN PHENOLOGY UNDER HIGH-YIELD CONDITIONS. **Field Crops Research**, v. 100, p.257-271, 2007.
- SHAHEEN, T.; RAHMAN, M.; SHAHID RIAZ, S.M.; ZAFAR, Y.; RAHMAN, M. Soybean production and drought stress. In: Abiotic and biotic stresses in soybean production. Soybean production, MIRANSARI, M. (Ed.). **ScienceDirect**, v.1, p.177-196, 2016.
- SHARMA, P.; DUBEY, R.S. Modulation of nitrate reductase activity in rice seedlings under aluminum toxicity and water stress: role of osmolytes as enzyme protectant. **Journal of Plant Physiology**, Rockville, v.162, p.854-864, 2005.
- SICHER, R.C. Temperature shift experiments suggest that metabolic impairment and enhanced rates of photorespiration decrease organic acid levels in soybean leaflets exposed to supra-optimal growth temperatures. **Metabolites**, v.5, p.443-454, 2015.
- SIDDIQUI, M.H.; MUTAHHAR, Y.; AL-KHAISHANY, A.; MOHAMMED, A.; ALQUTAMI, A.; MOHAMED, H.; WHAIBI, A.; GROVER, A.; HAYSSAM, M.; MONA, S.; AL-WAHIBI, A.; BUKHARI, N.A. Response of different genotypes of Faba Bean plant to drought stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v.16, p.10214-10227, 2015.
- SIEBERS, M.H.; YENDREK, C.R.; DRAG, D.; LOCKE, A.M.; ACOSTA, L.R.; LEAKEY, A.D.B.; AINSWORTH, E.A.; BERNACCHI, C.J.; ORT, D.R. Heat waves imposed during early pod development in soybean (*Glycine max*) cause significant yield loss despite a rapid recovery from oxidative stress. **Global Change Biology**, v.21, p.3114-3125, 2015.
- SILVA, A.J.; CANTERI, M.G.; SILVA, A.L. Haste verde e retenção foliar na cultura de soja. **Summa Phytopathologica**, v.39, n.3, p.151-156, 2013.
- SILVENTE, S.; SOBOLEV, A.P.; LARA, M. Metabolite adjustments in drought tolerant and sensitive soybean genotypes in response to water stress. **Plos One**, v.7, p.1-11, 2012.
- SIMEÃO, M. Crescimento e produtividade de grãos de soja sob déficit hídrico no solo. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal do Piauí. 2015. 78p.
- SMIRNOFF, N.; CUMBES, Q.J. Hydroxyl radical scavenging activity of compatible solutes. **Phytochemistry**, Murcia, v.28, p.1057-1060, 1989.
- SMITH, R. Introduction to remote sensing of the environment. Lincoln: **MicroImages**, Inc. 2001. 32p.

SOARES, L.H. Alterações fisiológicas e fenométricas na cultura de soja devido ao uso de lactofen, cinetina, ácido salicílico e boro. 2016. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

SOARES, L.H. **Manejo fisiológico com base em tratamento de sementes e aplicação de Organominerais via foliar para sistemas de alto potencial produtivo de soja.** 2013. 130p Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

STRECK, N.A.; ALBERTO, C.M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.41, n.9, p.1351-1359, 2006.

SZABADOS, L.; SAVOURÉ, A. Proline: a multifunctional amino acid. **Trends in Plant Science**, Cambridge, v.15, n.2, p.89-97, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954 p

TARDIEU, F. Plant response to environmental conditions: assessing potential production, water demand and negative effects of water deficit. **Frontiers in physiology**, [S.l.], v.4, p.1-7, 2013.

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

TEIXEIRA, W.F. **Aminoácidos e suas aplicações na agricultura.** 2016. 159f. Tese (Doutorado) - Curso de Fitotecnia, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

TEIXEIRA, W.F.; SOARES, L.H.; FAGAN, E.B.; MELLO, S.C.; REICHARDT, K.; DOURADO NETO, D. Amino acids as stress reducers in soybean plant growth under different water-deficit conditions. **Journal of Plant Growth Regulation**, [s.l.], v.39, n.2, p.905-919, 2019.

TONHATI, R. **L-prolina no alívio do estresse térmico em tomateiro cultivado em ambiente protegido.** 2018. 51f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Fitotecnia, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

ULLAH, H.; LUC, P.D.; GAUTAM, A.; DATTA, A. Growth, yield and silicon uptake of rice (*Oryza sativa*) as influenced by dose and timing of silicon application under water-deficit stress. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v.64, n.3, p.318-330, 2018.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Circular Series WAP 3-20:** World Agricultural Production. United States, 2020. 32p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Circular Series WAP 9-22:** World Agricultural Production. United States, 2022. 47p.

- VALDÉS-LÓPEZ, O.; BATEK, J.; GOMEZ-HERNANDEZ, N.; NGUYEN, C.T.; ISIDRA-ARELLANO, M.C.; ZHANG, N.; JOSHI, T.; XU, D.; HIXSON, K.K.; WEITZ, K.K.; ALDRICH, J.T.; PASA-TOLIC, L.; STACEY, G. Soybean roots grown under heat stress show global changes in their transcriptional and proteomic profiles. **Frontiers in Plant Science**, v.7, p.517, 2016.
- VALLIYODAN, B.; NGUYEN, H.T. Understanding regulatory networks and engineering for enhanced drought tolerance in plants. **Current Opinion in Plant Biology**, v.9, p.189-195, 2006.
- VERBRUGGEN, N.; HERMANS, C. Proline accumulation in plants: a review. **Amino Acids**, Vienna, v.35, p.753-759, 2008.
- VILLORDON, A.Q.; GINZBERG, I.; FIRON, N. Root architecture and root and tuber crop productivity. **Trends in Plant Science**, v.19, p.419-425, 2014.
- VISHWAKARMA, K.; UPADHYAY, N.; KUMAR, N.; YADAV, G.; SINGH, J.; MISHRA, R.K.; KUMAR, V.; VERMA, R.; UPADHYAY, R.G.; PANDEY, M.E.; SHARMA, S. Abscisic acid signaling and abiotic stress tolerance in plants: a review on current knowledge and future prospects. **Frontiers in Plant Science**, v.8, p.1-12, 2017.
- VITAL, R.G. **Mecanismos da tolerância ao déficit hídrico e à alta temperatura em cultivares de soja**. 2019. 94f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 2019.
- WEI, T.; DONG, Z.; ZHANG, C.; ALI, S.; CHEN, X.; HAN, Q.; ZHANG, F.; JIA Z.; ZHANG, P.; REN, X. Effects of rainwater harvesting planting combined with deficiency irrigation on soil water use efficiency and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield in a semiarid area. **Field Crops Research**, v.218, p.231-242, 2017.
- WELTMEIER, F.; EHLERT, A.; MAYER, C.S.; DIETRICH, K.; WANG, X.; SCHÜTZE, K.; ALONSO, R.; HARTER, K.; VICENTE-CARBAJOSA, J.; DRÖGE-LASER, W. Combinatorial control of Arabidopsis proline dehydrogenase transcription by specific heterodimerization of bZIP transcription factors. **The EMBO Journal**, London, v.25, p.3133-3143, 2006.
- XU, W.; CUI, K.; XU, A.; NIE, L.; HUANG, J.; PENG, S. Drought stress condition increases root to shoot ratio via alteration of carbohydrate partitioning and enzymatic activity in rice seedlings. **Acta Physiologiae Plantarum**, n.37, v.9, 2015.
- YOKOYAMA, A.H.; BALBINOT JÚNIOR, A.A.; ZUCARELI, C.; RIBEIRO, R.H. Índice de área foliar e Spad durante o ciclo de soja em função da densidade de plantas e sua relação com a produtividade de grãos. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, [s.l.], v.17, n.4, p.531-538, 2018.
- ZANON, A.J.; SILVA, M.R.; TAGLIAPIETRA, E.L.; CERA, J.C. Ecofisiologia de soja visando altas produtividades. Santa Maria: 2018. 136p.

ZHANG, J.; KIRKHAM, M.B. Lipid peroxidation in sorghum and sunflower seedlings as affected by ascorbic acid, benzoic acid, and propyl gallate. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v.149, p.489-493, 1996.

ZHANG, J.; LIU, J.; YANG, C.; DU, S.; YANG, W. Photosynthetic performance of soybean plants to water deficit under high and low light intensity. **South African Journal of Botany**: Amsterdam, v.105, n.4, p.279-287, 2016.

ZHAO, X.; HUANG, L.; ZHANG, X.; LI, Z.; PENG, Y. Effects of heat acclimation on photosynthesis, antioxidant enzyme activities, and gene expression in orchard grass under heat stress. **Molecules**, v.19, n.9, p.13564-13576, 2014.

ZHOU, R.; YU, X.; KJAER, K.H.; ROSENQVIST, E.; OTTOSEN, C.O.; WU, Z. Screening and validation of tomato genotypes under heat stress using Fv/Fm to reveal the physiological mechanism of heat tolerance. **Environmental and Experimental Botany**, v.118, p.1-11, 2015.

ZIPPER, S.C.; QIU, J.; KUCHARIK, C.J. Drought effects on US maize and soybean production: spatiotemporal patterns and historical changes. **Environmental Research Letters**, United Kingdom, v.11, n.9, p.1-12, 2016.