

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIAS E TECNOLOGIA GOIANO**

**EMILY CAROLINA DUARTE SANTOS**

**PAPEL DE COMPOSTOS ORGÂNICOS E INORGÂNICOS NA  
TOLERÂNCIA À SECA EM PLANTAS DE SOJA**

**RIO VERDE - GO  
2022**

EMILY CAROLINA DUARTE SANTOS

**PAPEL DE COMPOSTOS ORGÂNICOS E INORGÂNICOS NA  
TOLERÂNCIA À SECA EM PLANTAS DE SOJA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina TCC, do curso de Bacharelado em Ciências Biológicas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – IFGoiano, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof.(a) Dr.(a) Alan Carlos da Costa

Coorientador: Dr. (a) Adinan Alves da Silva

RIO VERDE – GO

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano**

S237p SANTOS, Emily Carolina Duarte  
Papel de compostos orgânicos e inorgânicos na  
tolerância à seca em plantas de soja / Emily Carolina  
Duarte SANTOS; orientador Alan Carlos da Costa; co-  
orientador Adinan Alves da Silva. -- Rio Verde,  
2022.  
35 p.

TCC (Graduação em Bacharelado em Ciências  
Biológicas) -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio  
Verde, 2022.

1. déficit hídrico. 2. soja. 3. prolina. 4.  
glicina-betaina . 5. óxido nítrico. I. Costa, Alan  
Carlos da , orient. II. Silva, Adinan Alves da , co-  
orient. III. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

## **TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

### **Identificação da Produção Técnico-Científica (assinale com X)**

- Tese
- Dissertação
- Monografia - Especialização
- Artigo - Especialização
- TCC - Graduação
- Artigo Científico
- Capítulo de Livro
- Livro
- Trabalho Apresentado em Evento
- Produção técnica. Qual: \_\_\_\_\_

Nome Completo do Autor: Emily Carolina Duarte Santos

Matrícula: 2018102230540054

Título do Trabalho: Papel de compostos orgânicos e inorgânicos na tolerância à seca em plantas de soja

### **Restrições de Acesso ao Documento [Preenchimento obrigatório]**

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: Estudo para desenvolvimento de uma nova formulação para indução de tolerância à seca em cultura de soja

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 06/04/2025

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

## DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

1. O documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
2. Obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
3. Cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, 06 de abril de 2022.

*Assinado eletronicamente pelo o Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais*

Emily Carolina Duarte Santos

Ciente e de acordo:

*Assinatura eletrônica do(a) orientador(a)*

Alan Carlos da Costa

Documento assinado eletronicamente por:

- **Emily Carolina Duarte Santos**, 2018102230540054 - Discente, em 06/04/2022 11:13:57.
- **Alan Carlos da Costa**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 06/04/2022 11:11:24.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 06/04/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 375791

Código de Autenticação: 9b6a3e0db0



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Reitoria

Rua 88, 310, Setor Sul, GOIANIA / GO, CEP 74.085-010

None



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 2/2022 - CCMBC-RV/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

### **ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO**

Ao vigésimo oitavo dia do mês de março de 2022, às 14 horas, reuniu-se a banca examinadora composta pelos doutores: Dr. Alan Carlos da Costa (orientador, IF Goiano Campus Rio Verde), Dr. Adinan Alves da Silva (membro, Pós-doc, PPGCA - AGRO/IF Goiano Campus Rio Verde), Dra. Priscila Ferreira Batista (membro, Pós-doc, PPGBio, IF Goiano Campus Rio Verde (membro) e pelo mestre Me. Gabriel Martins Almeida, (doutorando no PPGCA - AGRO/IF Goiano - Campus Rio Verde), para examinar o Trabalho de Curso intitulado: “PAPEL DE COMPOSTOS ORGÂNICOS E INORGÂNICOS NA TOLERÂNCIA À SECA EM PLANTAS DE SOJA” apresentado pela estudante Emily Carolina Duarte Santos, Matrícula nº 2028102230540054, do Curso de Bacharelado em Ciências Biológicas do IF Goiano - Campus Rio Verde. A palavra foi concedida a estudante para a apresentação oral do Trabalho de Curso e, em seguida, houve a arguição da candidata pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela APROVAÇÃO da estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelo orientador, em nome dos demais membros da banca.

Rio Verde, 28 de março de 2022.

(Assinado Eletronicamente)

Prof. Dr. Alan Carlos da Costa

Orientador

(Assinado Eletronicamente)

Dr. Adinan Alves da Silva

(Avaliador)

(Assinado Eletronicamente)

Dra. Priscila Ferreira Batista

(Avaliadora)

(Assinado Eletronicamente)

Me Gabriel Martins Almeida

(Avaliador)

Documento assinado eletronicamente por:

- Adinan Alves da Silva 2017202320140196 -Discente, em 31/03/2022 13:56:48.
- Gabriel Martins Almeida 2019202320140049 -Discente, em 31/03/2022 12:22:19.
- Priscila Ferreira Batista 2021102310840182 -Discente, em 31/03/2022 11:59:43.
- Alan Carlos da Costa, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO em 31/03/2022 11:46:25.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 29/03/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 372400

Código de Autenticação: d7df46db57



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, RIO VERDE / GO,  
CEP 75901-970  
(64) 3620-5600



## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe Sonilda Duarte minha maior fonte de inspiração, que sempre esteve ao meu lado me incentivando e me dando todo o apoio financeiro para que eu nunca desistisse do que almejava.

À minha irmã Evelyn Duarte que acreditou em meus sonhos, e que sempre esteve comigo torcendo para que eu pudesse concluir mais essa etapa.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alan Carlos, pela oportunidade de desenvolver pesquisa sob sua orientação desde o início da graduação. Agradeço pela confiança e o incentivo para ser uma boa cientista.

Ao meu Coorientador Dr. Adinan Alves, por ser um grande mentor e orientador e nunca medir esforços com sua disposição, motivação e conselhos durante a graduação. Obrigado pela amizade, paciência, e por contribuir para meu aprendizado.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia Goiano, por conceder bolsas de Iniciação Científica, e pela oportunidade de ingressar no curso de Bacharelado em Ciências Biológicas e concluí-lo com sucesso.

Ao Laboratório de Ecofisiologia e Produtividade Vegetal, por conceder estrutura, equipamentos e reagentes para realização dos projetos de pesquisa.

Ao doutorando Gabriel Martins, pela parceria na condução deste e demais trabalhos, obrigada por toda ajuda e colaboração.

À Dra. Priscila Batista pela amizade e conhecimento dedicado a mim na realização dos projetos no Laboratório de Ecofisiologia e Produtividade Vegetal.

A toda equipe do Laboratório de Ecofisiologia e Produtividade Vegetal, especialmente os pesquisadores que contribuíram com este trabalho, Dheyne Vieira, Isabelly Bernardi, Samira Jacinto e Vitor Barros.

Aos meus amigos de graduação pelo companheirismo, Bianca Santos, Samara Ribeiro, José Augusto e Valdeir Martins. As minhas amigas por estarem sempre ao meu lado, Anne Carvalho, Érica Lima e Érica Veloso. A amizade de vocês foram fundamentais para minha formação, por isso merecem o meu eterno agradecimento.

A todos os professores que contribuíram na minha formação.

A todos que de alguma forma contribuíram na realização deste trabalho.

## RESUMO

SANTOS, EMILY CAROLINA DUARTE. **Indução da tolerância a seca em plantas de soja por meio da aplicação de compostos orgânicos e inorgânicos**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Bacharelado em Ciências Biológicas. Instituto Federal Goiano campus Rio Verde, Goiás. Rio Verde Goiás, 2021.

A soja é a cultura de maior valor econômico, sendo o Brasil o maior produtor e exportador mundial dessa leguminosa. O déficit hídrico é o estresse que mais compromete os processos fisiológicos das plantas diminuindo o crescimento e a produtividade das plantas. Substâncias como prolina, glicina-betaína, óxido nítrico e o fosfito de potássio podem ajudar a proteger as plantas contra estresses abióticos, como a restrição hídrica. Desta forma, o objetivo deste estudo foi determinar os efeitos do déficit hídrico nas relações hídricas, trocas gasosas e parâmetros biométricos de uma cultivar de soja, diante da aplicação de compostos mitigadores de estresses. O experimento foi conduzido em casa de vegetação de ambiente controlado, com delineamento experimental de blocos ao acaso com 5 repetições e arranjo fatorial AxB 2x4, sendo o fator A as capacidades de campo (CC) do solo de 90% (controle) e 50% (déficit hídrico), e o fator B, as aplicações de 0 (água), formulação 1 (30 mM de prolina, 15 mM de glicina-betaína, 300 µM de nitroprussiato de sódio (SNP) e 1 L ha<sup>-1</sup> de fosfito de potássio), formulação 2 (45 mM de prolina, 22,5 mM de glicina-betaína, 450 µM de SNP e 1,5 L ha<sup>-1</sup> de fosfito de potássio), e formulação 3 (60 mM de prolina, 30 mM de glicina-betaína, 600 µM de SNP e 2 L ha<sup>-1</sup> de fosfito de potássio), totalizando 40 unidades experimentais. Os tratamentos foram impostos no início do florescimento das plantas de soja, mediante a pulverização e início da restrição hídrica no solo. As plantas ficaram sob déficit hídrico por 11 dias, e em seguida foram realizadas análises de pigmentos, relações hídricas, trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a* e parâmetros biométricos. Mesmo com a aplicação de substâncias aliviadoras de estresse, o DH impactou de forma negativa os parâmetros fotossintéticos, fluorescência, trocas gasosas e biométricos. As substâncias aplicadas não aumentaram a tolerância das plantas de soja neste estudo. Para uma melhor elucidação dos efeitos da utilização de substâncias aliviadoras de estresse de forma combinada em plantas sob estresse hídrico, é necessário realizar também análises de produção, bioquímicas e reprodutivas.

**Palavras-chave:** déficit hídrico, prolina, glicina-betaína, óxido nítrico

## ABSTRACT

Soybean is the crop with the highest economic value, with Brazil being the world's largest producer and exporter of this legume. Water deficit is the stress that most compromises the physiological processes of plants, decreasing plant growth and productivity. Substances such as proline, glycine-betaine, nitric oxide and potassium phosphite can help protect plants against abiotic stresses such as water restriction. Thus, the objective of this study was to determine the effects of water deficit on water relations, gas exchange and biometric parameters of soybean, in view of the application of stress-mitigating compounds, as well as to establish a better formulation. The experiment was carried out in a greenhouse in a controlled environment, with a randomized block design with 5 replications and AxB 2x4 factorial arrangement, with factor A being the field capacities (FC) of the soil of 90% (control) and 50% (water deficit), and factor B, applications of 0 (water), formulation 1 (30 mM proline, 15 mM glycine-betaine, 300  $\mu$ M sodium nitroprusside (SNP) and 1 L Ha<sup>-1</sup> phosphite of potassium), formulation 2 (45 mM proline, 22.5 mM glycine-betaine, 450  $\mu$ M SNP and 1.5 L Ha<sup>-1</sup> potassium phosphite), and formulation 3 (60 mM proline, 30 mM of glycine-betaine, 600  $\mu$ M of SNP and 2 L Ha<sup>-1</sup> of potassium phosphite), totaling 40 experimental units. The treatments were imposed at the beginning of the flowering of the soybean plants, by means of spraying and beginning of water restriction in the soil. The plants were under water deficit for 11 days, and then analyzes of pigments, water relations, gas exchange, chlorophyll a fluorescence and biometric parameters were performed. Even with the application of stress-relieving substances, WD had a negative impact on photosynthetic, fluorescence, gas exchange and biometric parameters. The substances applied did not increase the tolerance of soybean plants in this study. For a better elucidation of the effects of the use of stress-relieving substances in a combined way in plants under water stress, it is also necessary to carry out production, biochemical and reproductive analyses.

## Lista de Tabelas

- Tabela 1:** Resultados da Anova de trocas gasosas, relações hídricas, fluorescência da clorofila *a*, teores de pigmentos, parâmetros biométricos e taxa de liberação de eletrólitos (TLE).....08
- Tabela 2:** Teores de clorofila *a* (Cl<sub>a</sub>), Clorofila *b* (Cl<sub>b</sub>), carotenoides (Carot), clorofilas totais (Cl total), e taxa de extravasamento de eletrólitos (TLE).....22

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	01
2. HIPÓTESE.....	02
3. OBJETIVO.....	02
3.1. OBJETIVO GERAL.....	02
3.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	02
4. REFERENCIAL TEÓRICO.....	03
4.1. MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	03
4.2. PROLINA E GLICINA BETAÍNA.....	04
4.3. FOSFITO DE POTÁSSIO.....	04
4.4. ÓXIDO NITRICO.....	05
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	05
5.1. VARIÁVEIS ANALISADAS.....	06
5.1.1. RELAÇÕES HÍDRICAS .....	06
5.1.2. TROCAS GASOSAS .....	06
5.1.3. FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA <i>a</i> .....	07
5.1.4. TEOR DE PIGMENTOS CLOROPLASTÍDICOS.....	07
5.1.5. ANÁLISES BIOMÉTRICAS .....	07
5.1.6. DETERMINAÇÃO DO EXTRAVASAMENTO DE ELETRÓLITOS.....	07
5.1.7. DESENHO EXPERIMENTAL E ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	08
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	08
6.1. TROCAS GASOSAS.....	09
6.2. FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA <i>a</i> .....	11
6.3. RELAÇÕES HÍDRICAS.....	12
6.4. BIOMETRIA DAS PLANTAS.....	13
7. CONCLUSÃO.....	16
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	17
9. ANEXOS.....	22

## 1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é o segundo produto em toneladas mais produzido no Brasil, sendo a lavoura com maior valor de produção (IBGE, 2021). Além disso, o Brasil é o maior produtor e exportador mundial de soja (EMBRAPA, 2021). No entanto, um dos grandes desafios à prática da agricultura, em especial o cultivo da soja, tem sido os períodos de veranico. Este evento climático é caracterizado por um período prolongado de estiagem durante a estação chuvosa, resultando em déficit hídrico no solo, quase sempre acompanhado por altas temperatura e irradiância. Essa combinação de fatores de estresse tem limitado o desenvolvimento, a eficiência reprodutiva e, conseqüentemente, a produtividade da cultura da soja (ALMEIDA et al., 2021; DOLFERUS & PACINI, 2019).

Plantas sob déficit hídrico podem apresentar modificações em diversos processos, por exemplo, redução no teor de clorofilas (MAMNABI et al., 2020), fechamento estomático e conseqüentemente, redução na assimilação de CO<sub>2</sub> e incremento da fotorrespiração (TARIQ et al., 2018; CASTRO et al., 2019). Inclusive, o déficit hídrico é considerado o estresse que mais compromete os processos fisiológicos das plantas (RAJABI et al., 2019), independentemente do seu estágio de desenvolvimento. Entretanto, a fase de floração e o enchimento de grãos são especialmente mais sensíveis o que impacta diretamente da produção de grãos (HINOJOSA et al., 2019; BATISTA et al., 2019).

Uma possível maneira de minimizar os efeitos da restrição hídrica é a utilização de substâncias mitigadoras de estresses (BATISTA et al., 2019, ALMEIDA et al., 2020). A pulverização dessas substâncias aumenta a tolerância à seca das plantas, principalmente pelo aumento das defesas antioxidantes celulares, da eficiência do uso da água, indução de ajustamento osmótico e manutenção da turgescência celular (SULTANA et al., 2016; YAVAS et al., 2016; MA et al., 2017).

A prolina é um metabólito que possui o papel importante no ajustamento osmótico em condições de estresse, principalmente por déficit hídrico, atuando como antioxidante e osmoprotetor de estruturas celulares, como as membranas (SADAK et al., 2019). De forma semelhante à prolina, a glicina-betaína induz o ajustamento osmótico, mas também auxilia na estabilização de proteínas, incluindo a RUBISCO, protegendo o aparato fotossintético da planta e eliminando as EROs (WANI et al., 2019; ILYAS et al., 2021). Ainda, estudos têm demonstrado a eficácia da aplicação

exógena de doadores de óxido nítrico, por exemplo, o nitroprussiato de sódio (SNP), evidenciando o efeito protetor dessa molécula contra o estresse por seca, pela redução de danos celulares e manutenção do crescimento vegetal (DOMINGOS et al., 2015; HASANUZZAMAN et al., 2017; SOUSA et al., 2020).

O potássio (K) também está envolvido em diversos processos fisiológicos e metabólicos na célula vegetal, promovendo o balanço iônico, a síntese de proteínas, e atuando na regulação estomática e melhoria da eficiência no uso da água de plantas sob déficit hídrico (RAZA et al., 2013; ZAHOOR et al., 2017).

Sendo a soja a cultura de grãos mais importante do mundo (USDA, 2021) devido sua utilização na alimentação humana, produção de óleo vegetal, biodiesel, produtos processados e concentrados de proteínas para alimentação animal, faz-se necessário encontrar métodos alternativos para minimizar os efeitos negativos iminentes da restrição hídrica para garantir manutenção da produtividade dessa cultura.

## **2. HIPÓTESE**

Um composto contendo prolina, glicina-betaína, óxido nítrico e fosfito de potássio diminui os danos causados pelo déficit hídrico sob plantas de soja.

## **3. OBJETIVO**

### **3.1. Objetivo geral**

Avaliar o potencial de três formulações contendo prolina, glicina-betaína, óxido nítrico e fosfito de potássio para mitigar danos do estresse por déficit hídrico na fisiologia, relações hídricas e parâmetros biométricos de plantas de soja.

### **3.2. Objetivos específicos**

a) Determinar os efeitos do déficit hídrico nas relações hídricas, no processo fotossintético e nos parâmetros biométricos de uma cultivar de soja, na ausência e na presença de compostos mitigadores de danos do estresse;

b) Estabelecer a melhor formulação de um composto mitigador de estresse hídrico em plantas de soja.

## 4. REFERENCIAL TEÓRICO

Com quase 39 milhões de hectares de área plantada com soja e uma produção de 135 milhões de toneladas do grão, o Brasil é o maior produtor e exportador de soja no mundo, ocupando 50% do comércio mundial de soja (CONAB, 2021, FAO, 2021). Sendo a cultura de grãos mais importante do mundo (USDA, 2021), a soja pode ser utilizada na alimentação humana, produção de óleo vegetal, biodiesel, produtos processados e concentrados de proteínas para alimentação animal.

À medida que a população mundial aumenta é crescente a demanda por alimentos, entretanto, o aquecimento global surge como um desafio ao incremento da produção (FRÓNA et al., 2019, TRIPATHI et al., 2019). Deste modo, a alimentação futura das populações mundiais, em parte depende do desenvolvimento de formulações capazes de melhorar o desempenho das plantas sob condições de déficit hídrico. Desta forma, encontrar métodos alternativos para minimizar os efeitos negativos iminentes da restrição hídrica é imprescindível para a manutenção da produtividade dessa cultura.

### 4.1. Mudanças climáticas

A quantidade de radiação absorvida pela atmosfera causa uma elevação da temperatura terrestre e um aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, ocasionado o que chamamos de efeito estufa (MONTZKA et al., 2011). O aquecimento global é um grande desafio para os produtores de alimentos, pois as ondas de calor aumentam a demanda de evaporação, fazendo com que o solo seque mais rápido e elevando o grau de seca que vinculada à diminuição da precipitação e alta intensidade luminosa, vem ocasionando secas mais intensas e duradoras (ALVES et al., 2021; MILHORANCE et al., 2022).

Em regiões de produção agrícola, a ocorrência de períodos de veranicos tem ocasionado grandes perdas ao setor agrícola brasileiro, marcando as piores secas já registradas (RIBEIRO et al., 2018). O nível de estresse por déficit hídrico pode variar conforme sua duração, intensidade e estágio fenológico da cultura, onde sabe-se que em plantas de soja a fase de floração e enchimento de grãos são as mais sensíveis (HINOJOSA et al., 2019; BATISTA et al., 2019).

As condições de restrição hídrica, associada ou não a outros fatores de estresse abiótico, provocam a diminuição da fertilização, aumento do abortamento precoce de embriões e, conseqüentemente, um menor número de sementes ou grãos



(PRASAD et al., 2008). E nessas condições adversas, o desenvolvimento do gametófito masculino é uma das etapas mais afetadas (MESIHOVIC et al., 2016). Entende-se que o abortamento de tecidos florais (pólen ou ovário) podem se dar pela diminuição do potencial hídrico, do fluxo de carboidratos ou nitrogênio, bem como a sinalização hormonal (PRASAD et al., 2008; DOLFERUS; PACINI, 2019).

#### **4.2. Prolina e glicina-betaína**

A prolina e a glicina-betaína são metabólitos celulares amplamente reconhecidos como cruciais no ajustamento osmótico, sendo um aminoácido e uma amina quaternária, respectivamente. A prolina possui o papel importante no ajustamento osmótico em condições de estresse, principalmente por déficit hídrico, atuando como antioxidante e osmoprotetor de estruturas celulares como as membranas (SADAK et al., 2019, ABDELAAL et al., 2020). Logo, a pulverização de prolina tem sido realizada com objetivo de melhorar a tolerância de plantas a fatores de estresses abióticos e fitotoxicidade ocasionada por herbicidas (REDDY et al., 2015; PER et al., 2017). Aplicação semelhante observa-se para a glicina-betaína (GB), cujos estudos demonstram efeitos positivos, tanto pelos incrementos de GB endógena, quanto da aplicação de GB em plantas sob estresses (ROYCHOUDHURY e BANERJEE, 2016).

Semelhantemente à prolina, estudos associam a GB a uma melhor tolerância ao estresse hídrico (CASTIGLIONI et al 2018), além de induzir o ajustamento osmótico que resulta em melhor crescimento da planta, a GB também auxilia na estabilização de proteínas, incluindo a RUBISCO, protegendo o aparato fotossintético da planta e eliminando EROs (WANI et al., 2019; ILYAS et al., 2021).

#### **4.3. Fosfito de potássio**

Algumas substâncias de natureza inorgânica também estão envolvidas no ajustamento osmótico nas plantas, sendo o potássio (K) o íon mais intimamente envolvido com essa resposta. Este elemento está envolvido em diversos processos fisiológicos e metabólicos na célula vegetal, promovendo o balanço iônico, a síntese de proteínas, e atuando na regulação estomática e melhoria da eficiência no uso da água de plantas sob déficit hídrico (RAZA et al., 2013; ZAHOOR et al., 2017). Considerando que a restrição hídrica no solo dificulta a disponibilização e a absorção

dos nutrientes, a aplicação de K pode contribuir para crescimento e produtividade das culturas sob seca (RAZA et al. 2018).

A aplicação de fosfito de potássio em plantas de girassol ativou respostas antioxidantes e promoveu um melhor ajuste do potencial hídrico, permitindo uma melhor manutenção da água nos tecidos foliares, de forma a amenizar os efeitos do estresse hídrico (ALMEIDA et al., 2020). Já em plantas de batata a aplicação de fosfito de potássio promoveu um efeito protetor na maquinaria fotossintética sob estresse UV-B, diminuindo o estresse oxidativo e aumentando os mecanismos de defesa da planta. (OYARBURO et al., 2015).

#### **4.4. Óxido nítrico**

O estresse hídrico induz a produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (EROs) que danificam os lipídios, proteínas, pigmentos fotossintéticos e ácidos nucleicos (AKRAM et al., 2018). O óxido nítrico (ON) entretanto é considerado uma espécie reativa de nitrogênio, altamente difusível, que atua como sinalizador endógeno em diversos processos fisiológicos, como germinação e floração, contudo, possui grande importância durante eventos de estresses (DOMINGOS et al., 2015).

Em plantas sob efeitos da seca, o ON atua na regulação da abertura estomática, melhorando o desempenho fotossintético, teor de clorofilas, potencial hídrico foliar e parâmetros de crescimento (LEITE et al., 2019). Em plantas de soja, já foi relatado que o ON desempenha um papel antioxidante, ou estimulante de defesas antioxidantes enzimáticas e não enzimáticas (SOUSA et al., 2020). O conteúdo relativo de água das plantas também pode ser mantido em função da aplicação do ON, mesmo sob condição de déficit hídrico. Além disso o ON também permite a manutenção da atividade fotoquímica inibindo a produção de EROs (BATISTA et al., 2018)

Estudos recentes têm demonstrado a eficácia da aplicação exógena de doadores de ON, assim como o nitroprussiato de sódio (SNP), evidenciando o efeito protetor contra o estresse por seca, pela redução de danos celulares e manutenção do crescimento (HABIB et al., 2020; HASANUZZAMAN et al., 2017; SOUSA et al., 2020).

### **5. MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi conduzido em casa de vegetação de ambiente controlado do Laboratório de Ecofisiologia e Produtividade Vegetal do Instituto Federal Goiano -

Campus Rio Verde. Foram utilizados vasos de polietileno de 12 litros preenchidos com solo. Cada vaso representou uma unidade experimental onde foram semeadas 10 sementes de soja da cultivar Bônus, que já havíamos utilizado em estudos anteriores semelhantes. Após 10 dias do plantio foi realizado o desbaste, deixando 3 plantas em cada vaso.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com 5 repetições e arranjo fatorial AxB 2x4, sendo o fator A as capacidades de campo (CC) do solo de 90% (controle) e 50% (déficit hídrico), e o fator B, as aplicações de 0 (água), formulação 1 (30 mM de prolina, 15 mM de glicina-betaína, 300  $\mu$ M de nitroprussiato de sódio (SNP) e 1 L ha<sup>-1</sup> de fosfito de potássio), formulação 2 (45 mM de prolina, 22,5 mM de glicina-betaína, 450  $\mu$ M de SNP e 1,5 L ha<sup>-1</sup> de fosfito de potássio), e formulação 3 (60 mM de prolina, 30 mM de glicina-betaína, 600  $\mu$ M de SNP e 2 L ha<sup>-1</sup> de fosfito de potássio), totalizando 40 unidades experimentais.

Para aplicação das formulações foi utilizado um pulverizador costal (Herbicat® Catanduva, Brasil) com pressão constante, mantida por CO<sub>2</sub> comprimido, possuindo uma barra com quatro pontas de pulverização e bico da série (XRTeejet®), do tipo leque modelo XR 110 02 - VP. O volume de aplicação considerado foi de 150 L ha<sup>-1</sup>. Os regimes hídricos foram impostos utilizando o método gravimétrico uma vez ao dia, para o controle da umidade do solo.

Os tratamentos foram impostos no estágio de desenvolvimento R1 (início do florescimento) das plantas de soja, mediante a pulverização das plantas e início da restrição hídrica no solo. As plantas ficaram sob déficit hídrico por 11 dias, e neste momento foram realizadas as análises de relações hídricas, trocas gasosas, pigmentos fotossintéticos, fluorescência da clorofila *a*, e parâmetros biométricos.

## **5.1. Variáveis Analisada**

### **5.1.1. Relações hídricas**

O potencial hídrico da antemanhã foi medido utilizando de uma câmara de pressão do tipo Scholander, no horário entre as 04 e 06 horas da manhã. Para a avaliação do potencial osmótico foi utilizado um osmômetro de pressão de vapor (VAPRO 5600).

### **5.1.2. Trocas gasosas**

A taxa fotossintética [ $A$ ;  $\mu\text{mol} (\text{CO}_2) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ], condutância estomática ao vapor de água [ $g_s$ ;  $\text{mol} (\text{H}_2\text{O}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ], a relação entre a concentração interna ( $C_i$ ) e externa ( $C_a$ ) de  $\text{CO}_2$  ( $C_i/C_a$ ), a taxa de transpiração [ $E$ ;  $\text{mmol} (\text{H}_2\text{O}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ] e a eficiência instantânea do uso da água [EUA,  $\mu\text{mol} (\text{CO}_2) \text{mmol} (\text{H}_2\text{O})^{-1}$ ] foram estimadas utilizando um analisador de gases infravermelho (IRGA) (LI-6800, LI-COR Inc., Lincoln, NE, EUA).

### **5.1.3. Fluorescência da clorofila *a***

As variáveis de fluorescência da clorofila *a* foram obtidas na mesma área da folha em que foram realizadas as medidas das trocas gasosas, com auxílio do fluorômetro acoplado ao IRGA. Com as folhas adaptadas à luz, foram determinadas as seguintes variáveis: rendimento quântico efetivo do PSII (YII) (Genty et al. 1989) e a taxa aparente de transporte de elétrons (ETR) (BILGER et al. 1995).

### **5.1.4. Teores de pigmentos cloroplastídicos**

Para a determinação da concentração dos pigmentos cloroplastídicos (clorofilas *a*, *b* e carotenoides), 03 (três) discos foliares de 0,5 cm de diâmetro foram imersos em 5 ml de dimetilsulfóxido (DMSO), saturado com carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), em frascos protegidos da luz. Após 6 horas de incubação das amostras a  $60^\circ\text{C}$  foram realizadas leituras da absorvância do extrato nos comprimentos de onda de 665, 649 e 480 nm. As concentrações dos pigmentos foram calculadas de acordo com as equações propostas por Wellburn (1994) e os resultados expressos em  $\mu\text{g cm}^{-2}$ .

### **5.1.5. Análises biométricas**

Para as análises biométrica foram medidas, a altura de planta (AP, cm), número de folhas (NF), número de nós (NN), número de ramos (NR) e o diâmetro de caule (DC, mm). As folhas e caules foram levados a uma estufa de secagem e esterilização com circulação e renovação de ar (modelo MA035/1152, MARCONI Inc., Piracicaba SP, Brasil) por 72 horas, e posteriormente, foi mensurada a massa seca de folha (MSF, g) e massa seca de caule (MSC, g).

### **5.1.6. Determinação do extravasamento de eletrólitos**

A avaliação indireta de danos em membranas celulares foi determinada por meio da análise do extravasamento de eletrólitos, segundo adaptação das

metodologias descritas por Vasquez-Tello et al. (1990) e Pimentel et al. (2002). A permeabilidade da membrana foi avaliada em 10 discos foliares com 0,5 cm<sup>2</sup> de diâmetro. Os discos foliares permaneceram por 24 horas em 15 ml de água deionizada e após este período, foi determinada a condutividade livre (CL, µS/cm) da água, utilizando-se um condutivímetro de bancada. Em seguida, os frascos foram levados à estufa a 100 °C por 1 hora e após resfriamento, foi determinada a condutividade total da água (CT, µS/cm). A taxa de extravasamento de eletrólitos, dada em porcentagem, foi calculada por meio da seguinte fórmula TLE (%) = [(CL/CT) X 100].

### 5.1.7. Desenho experimental e análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância onde verificou os efeitos dos fatores isolados e sua interação (teste F,  $\alpha < 0.05$ ). Quando verificada diferença entre os tratamentos, o teste de comparações múltiplas de médias (teste de Tukey,  $\alpha < 0.05$ ) foi empregado. As análises foram realizadas por meio do software estatístico SISVAR (versão 5.6). Os gráficos foram montados no software Microsoft Excel.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros avaliados de taxa transpiratória (*E*), taxa fotossintética (*A*), eficiência instantânea do uso da água (EUA), razão entre a concentração interna e externa de CO<sub>2</sub> (*Ci/Ca*), condutância estomática (*gs*), taxa aparente de transporte de elétrons (ETR) e rendimento quântico efetivo do fotossistema II (YII) (Tabela 1) difeririam estatisticamente apenas em função do fator água. O mesmo se observou para os parâmetros de potencial hídrico ( $\Psi_w$ ) e potencial osmótico ( $\Psi_s$ ) (Tabela 1). Quanto aos parâmetros biométricos, as variáveis de altura de planta (AP) e número de nós (NN) diferiram apenas para o fator água isolado, enquanto número de ramos (NR), número de folhas (NF), massa seca das folhas (MSF), massa seca do caule (MSC) e o diâmetro de caule (DC) foram estatisticamente alterados pela interação entre os fatores água x formulação (Tabela 1). Os teores de clorofila *a* (Cl<sub>a</sub>), Clorofila *b* (Cl<sub>b</sub>), carotenoides, clorofilas totais (Cl total), e taxa de extravasamento de eletrólitos (TLE) não apresentaram diferença significativa para nenhum dos fatores isolados, nem para a interação entre os fatores deste estudo (Tabela 1).

**Tabela 1:** Resultados da Anova das variáveis de trocas gasosas (*E*, *A*, EUA, *Ci/Ca*, *gs*), relações hídricas (potenciais hídrico e osmótico), fluorescência da clorofila *a* (YII e

ETR), teores de pigmentos (teores de clorofilas *a*, *b*, clorofilas totais e carotenoides), parâmetros biométricos (altura de planta, diâmetro de caule, números de nós, de ramos e de folhas, massa seca de caule-MSC e massa seca de folhas-MSF) e taxa de liberação de eletrólitos (TLE), em plantas de soja (*Glycine max (L.) Merril*) submetidas as seguintes condições: 90% da CC (controle) e 50% da CC (déficit hídrico), onde F0 é aplicação de água, F1 (30 mM de prolina, 15 mM de glicina-betaína, 300  $\mu$ M de nitroprussiato de sódio (SNP) e 1 L ha<sup>-1</sup> de fosfito de potássio), F2 (45 mM de prolina, 22,5 mM de glicina-betaína, 450  $\mu$ M de SNP e 1,5 L ha<sup>-1</sup> de fosfito de potássio), e F3 (60 mM de prolina, 30 mM de glicina-betaína, 600  $\mu$ M de SNP e 2 L ha<sup>-1</sup> de fosfito de potássio).

Variáveis	Água	Formulações	Água x Formulação	CV (%)
<i>E</i>	*	ns	ns	32,28
<i>A</i>	*	ns	ns	27,76
EUA	*	ns	ns	33,02
<i>Ci/Ca</i>	*	ns	ns	13,64
<i>gs</i>	*	ns	ns	38,7
YII	*	ns	ns	23,28
ETR	*	ns	ns	23,2
Cl <sub>a</sub>	ns	ns	ns	13,16
Cl <sub>b</sub>	ns	ns	ns	17,36
Carotenoides	ns	ns	ns	13,65
Cl total	ns	ns	ns	13,21
Altura de planta	*	ns	ns	9,87
Diâmetro de caule	ns	ns	*	13,26
Nº Nós	*	ns	ns	5,66
Nº Ramos	*	ns	*	19,92
Nº Folhas	*	ns	*	12,8
Potencial osmótico	*	ns	ns	-9,94
Potencial hídrico	*	ns	ns	-30,38
TLE	ns	ns	ns	12,61
MSC	*	ns	*	16,43
MSF	*	ns	*	16,49

\*: Houve diferença significativa e ns: não houve diferença significativa, pelo Teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

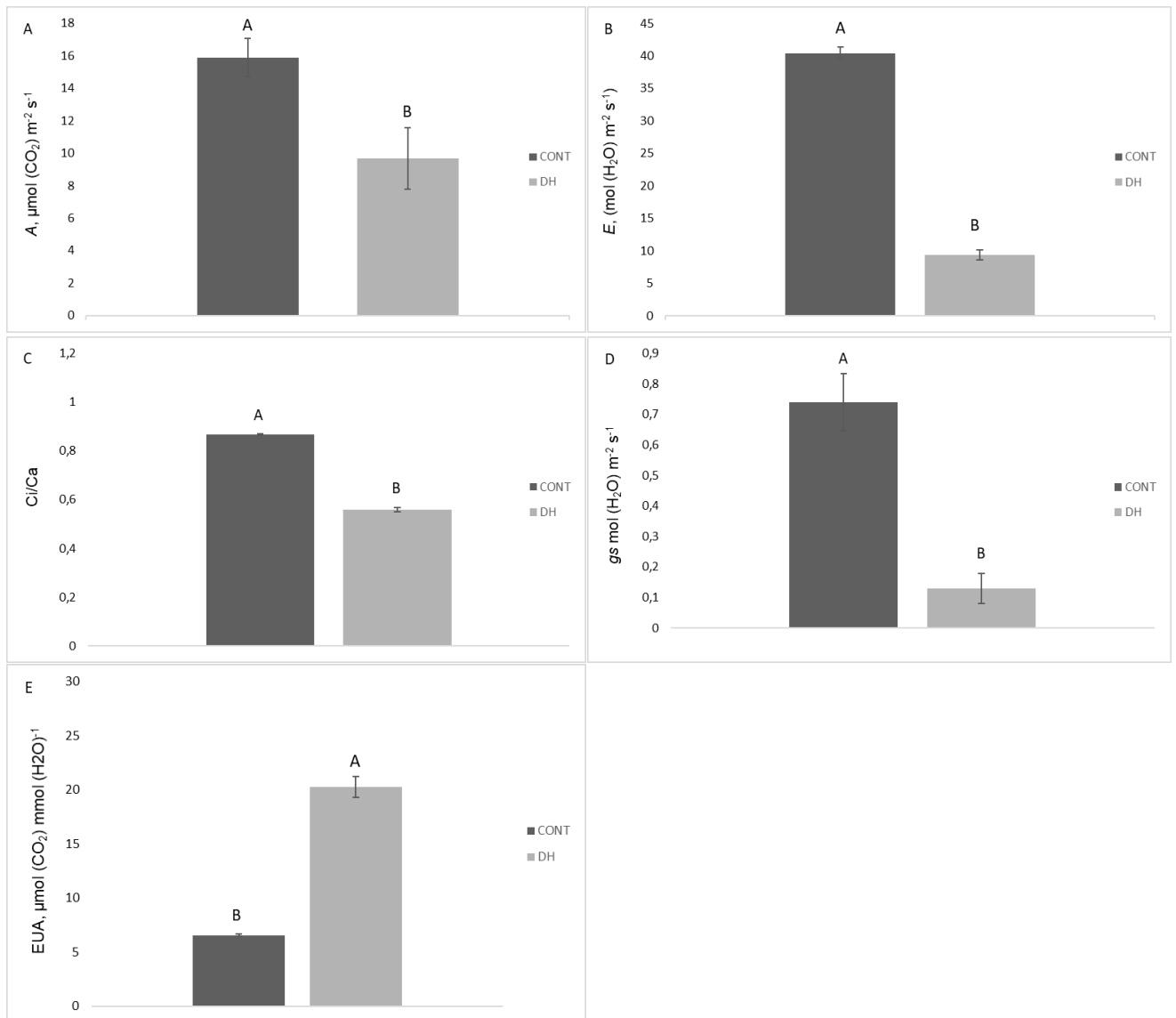
### 6.1 Trocas gasosas

O déficit hídrico afetou negativamente as trocas gasosas das plantas de soja, havendo redução significativa de *A*, *E*, *gs*, *Ci/Ca* (Figura 1A-D). As respostas das plantas e a adaptação a estresses abióticos se refletem em mudanças em suas taxas fotossintéticas (SULEIMAN et al., 2022). Uma estratégia comum para evitar os efeitos da seca nas lavouras é o ajuste estomático pelas plantas a fim de reduzir a transpiração. Essa resposta rápida dos estômatos é um mecanismo de aclimatação à

seca para conservar a água do solo e manter um maior potencial hídrico foliar (LAWSON & VIALET-CHABRAND, 2019). Essa resposta, porém, reduz a captação de CO<sub>2</sub> e ao mesmo tempo a concentração interna de CO<sub>2</sub> no mesofilo. Essa redução induz a inativação da enzima Rubisco, o que conseqüentemente, reduz a taxa fotossintética (NAIDOO & NAIDOO, 2018, SINGH et al. 2018).

A EUA (*A/E*) aumentou significativamente nas plantas sob condição de déficit hídrico (Figura 1E). Plantas em condições de seca precisam moderar a perda de água e ao mesmo tempo, permitir a absorção suficiente de CO<sub>2</sub> para a fotossíntese. Essa resposta pode ser representada pelo aumento na eficiência no uso da água, sendo este um importante indicativo de adaptabilidade da planta em condições de restrições hídricas (LIU et al., 2019).

Apesar desse estudo não demonstrar a influência das formulações nas trocas gasosas de plantas de soja submetidas a seca, estudos anteriores observaram que a aplicação foliar de prolina diminuiu a inibição da fixação de CO<sub>2</sub>, e melhorou a fotossíntese de plantas de milho sob déficit hídrico (DH), diminuindo a degradação das clorofilas e ao mesmo tempo, aumentando a taxa fotossintética (ALTUNTAŞ et al. 2020). O mesmo foi relatado para a aplicação de óxido nítrico, em que estudos mostraram que a pulverização de nitroprussiato de sódio (SNP) promoveu uma melhora da condutância estomática, taxas fotossintéticas e a atividade fotoquímica (BATISTA et al., 2018), além de aumentar o teor de clorofila e o crescimento de plantas de soja sob déficit hídrico (LEITE et al., 2019, SOUSA et al., 2020).



**Figura 1:** Taxa fotossintética (A; A), taxa transpiratória (E; B), razão entre a concentração interna e externa de  $\text{CO}_2$  ( $C_i/C_a$ ; C), condutância estomática ( $g_s$ ; D) e eficiência instantânea do uso da água (EUA, E) em plantas de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) submetidas as seguintes condições: 90% da CC (controle) e 50% da CC (déficit hídrico). Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Os dados são média  $\pm$  EP ( $n=20$ ).

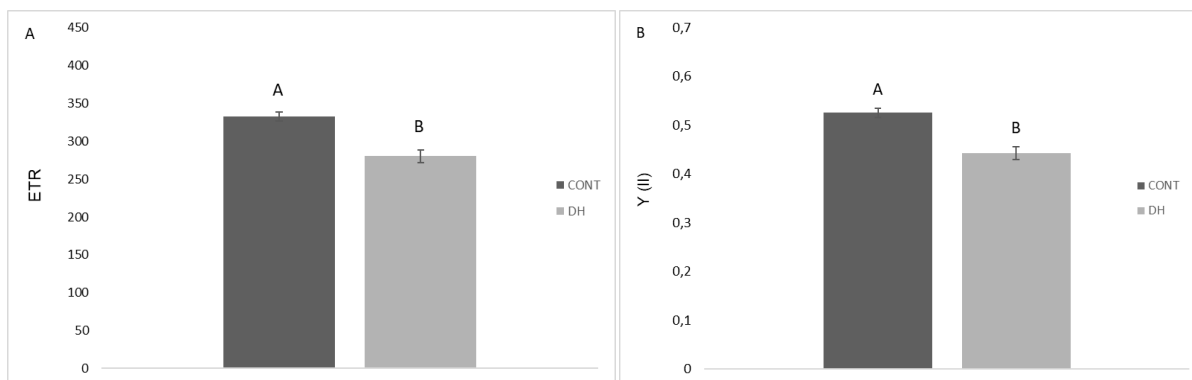
## 6.2. Fluorescência da clorofila a

Verificou-se em plantas sobre déficit hídrico menores valores de taxa aparente de transporte de elétrons (ETR, Figura 2A) e rendimento quântico efetivo do fotossistema II ( $Y_{II}$ , Figura 2B). Possivelmente, isso ocorreu devido a redução da abertura estomática, conforme verificado pela redução em  $g_s$  (Figura 1D). Isso leva à diminuição da disponibilidade de  $\text{CO}_2$  no sítio de carboxilação da RUBISCO (URBAN et al. 2017, TAIZ et al. 2017), reduzindo assim a oxidação de NADPH no ciclo de



Calvin, de forma, que não tenha o aceptor primário de elétrons ( $\text{NADP}^+$ ), suficientemente disponível na etapa fotoquímica da fotossíntese. Assim, a ETR é inibida (BAKER e ROSENQVIST 2004; ARO et al. 1993), e conseqüentemente, o  $Y_{II}$  é reduzido (DĄBROWSKI et al., 2019).

As formulações não influenciaram na ETR e  $Y_{II}$ . Porém há estudos onde a prolina exógena melhorou significativamente a eficiência de PSII em plântulas de milho expostas a déficit hídrico (ALTUNTAŞ et al. 2020). No entanto, resultados semelhantes não foram observados neste estudo.



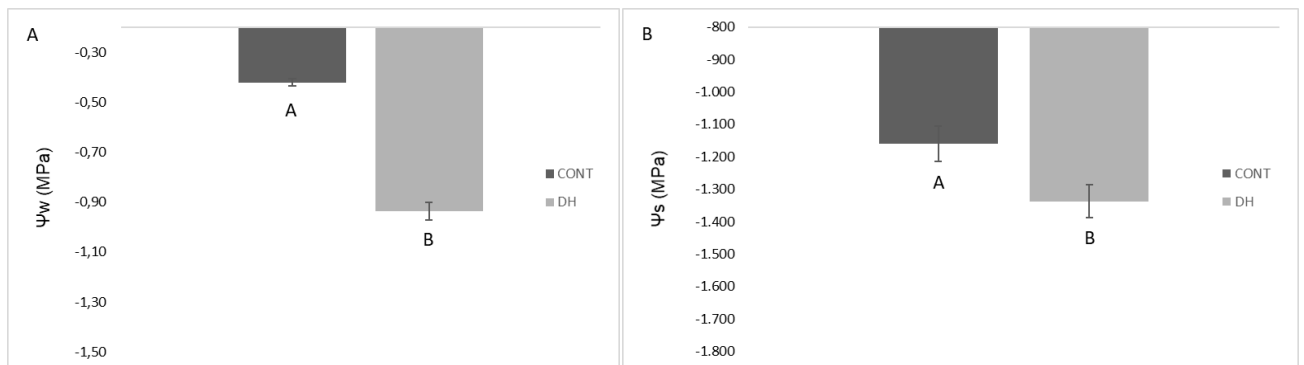
**Figura 2:** Taxa aparente de transporte de elétrons (ETR; A), rendimento quântico efetivo do fotossistema II ( $Y_{II}$ ; B) em plantas de soja (*Glycine max (L.) Merrill*) submetidas as seguintes condições: 90% da CC (controle) e 50% da CC (déficit hídrico). Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Os dados são média  $\pm$  EP ( $n=20$ ).

### 6.3. Relações hídrica

O déficit hídrico reduziu significativamente o potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) (Figura 3A) e o potencial osmótico ( $\Psi_s$ ) foliar (Figura 3B), mas não houve influência das formulações nos resultados dessas variáveis. A redução do potencial hídrico foliar é uma resposta comum de aclimação de plantas ao déficit hídrico (AMOAH et al., 2019). As plantas de soja apresentaram uma regulação estomática efetiva, reduzindo a perda de água e diminuindo a transpiração foliar, permitindo assim o transporte de água para as raízes sob déficit hídrico (HATFIELD & DOLD, 2019).

A aplicação de fosfito de potássio em plantas de girassol sob DH amenizou os efeitos do estresse hídrico, promovendo um melhor ajuste do potencial hídrico (ALMEIDA et al., 2020). Ação parecida é observada para o óxido nítrico, que promoveu o ajustamento osmótico pela indução no acúmulo de solutos compatíveis e aumento da síntese de osmólitos como a prolina e glicina-betaína (GB) em plantas de soja (REZAYIAN et al., 2020, HABIB et al., 2020). Porém, outros estudos mostraram que a contribuição da glicina-betaína quando metabolizada de forma natural em

plantas sob estresse hídrico, não tem um papel importante no ajuste osmótico (ESCALANTE et al., 2019). De forma semelhante ao observado nas plantas de soja deste estudo, a aplicação foliar de GB também não teve o efeito esperado de indução de melhoria na tolerância à seca em plantas de milho (ASMA et al., 2006). Nesse estudo também, não observamos efeitos das formulações nas relações hídricas das plantas de soja sob déficit hídrico.



**Figura 3:** Potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ; A) e potencial osmótico ( $\Psi_s$ ; B), em plantas de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) submetidas as seguintes condições: 90% da CC (controle) e 50% da CC (déficit hídrico). Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Os dados são média  $\pm$  EP ( $n=20$ ).

#### 6.4 Biometria da planta

A massa seca do caule (MSC, Figura 4A) e o diâmetro do caule (DC, Figura 4D) não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos com as formulações. O F1 foi o único tratamento que as plantas controles diferiram estatisticamente das plantas sob DH, apresentando menores valores nessa última condição. É possível observar o mesmo padrão para a massa seca da folha (MSF, Figura 4C), em que o F1 obteve menores valores quando as plantas estavam sob DH que as controles. Não houve diferença significativa para nenhum tratamento quanto as formulações para essas variáveis.

Quanto à altura da planta (AP, Figura 4D) e o número de nós (NN, Figura 4E), o déficit hídrico mostrou menores valores em relação as plantas controles, não havendo diferença significativa entre as formulações. Essa diminuição está relacionada com a redução da absorção de água do solo e, conseqüentemente, à diminuição da divisão celular e alongamento, bem como o crescimento das plantas (ABDELAAL et al 2017).

Quanto ao número de ramos (NR, Figura 4C), nos tratamentos F1 e F2 observou-se valores menores no DH, em relação aos seus respectivos controles. Não houve diferença significativa para nenhum tratamento quanto as formulações. Já quanto o número de folhas (NF, Figura 4E) as plantas F1 e F2 demonstraram o mesmo comportamento no tratamento DH, sendo os valores menores do que no controle.

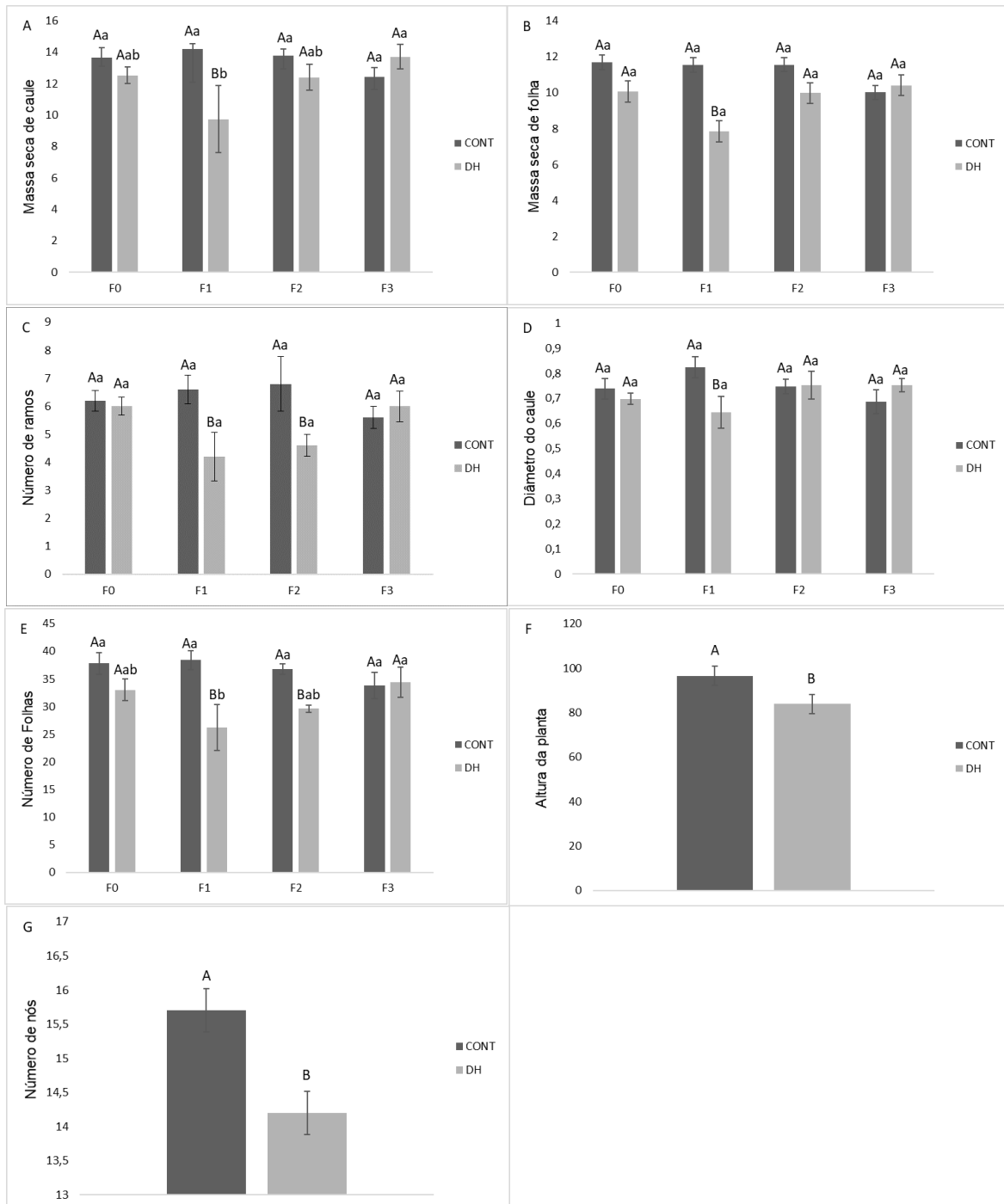
A aplicação foliar de prolina em muitos estudos promoveu melhorias nos parâmetros biométrico das plantas, como comprimento do caule, número de folhas e massa fresca e seca de plantas submetida ao estresse hídrico (ABDELAAL et al., 2020). Mas, em estudo com plantas de soja, a aplicação de prolina otimizou a massa seca das plantas e a produtividade da cultura apenas quando em déficit hídrico moderado (TEIXEIRA et al., 2020).

Não houve diferença significativa quanto as formulações para nenhum tratamento. Porém, vários estudos mostraram que o óxido nítrico (ON) pode promover o crescimento e produção de biomassa em plantas sob déficit hídrico (REZAYIAN et al., 2020). Assim como a aplicação exógena de metabólitos como prolina e glicina-betaína que contribuem na manutenção do crescimento da planta e do turgor celular, esses solutos são favoráveis na tolerância de plantas expostas à seca, promovendo o ajustamento osmótico, que, resulta em melhor crescimento da planta (ILYAS et al., 2021).

No presente estudo, o déficit hídrico teve um impacto negativo sob as plantas de soja, e apesar de ser esperado um melhor desempenho das plantas que receberam aplicações das formulações, este efeito não foi manifestado. Ao contrário do observado para outros estudos, onde a aplicação exógena de GB melhorou o crescimento, rendimento e o metabolismo de plantas de milho expostas ao estresse hídrico (SHAFIQ et al., 2021); promoveu um aprimoramento da tolerância à seca em lavouras de arroz, melhorando o crescimento e atributos de rendimento das plantas (TISARUM et al., 2019), nesse estudo, as respostas das plantas de soja basicamente variaram em função da disponibilidade hídrica no solo.

De modo geral, a seca promoveu uma redução dos produtos da fotossíntese, causando redução na área foliar e redução na translocação de assimilados para as folhas, acarretando na diminuição dos demais parâmetros biométricos (GORGINI et al., 2021). Para uma melhor elucidação dos efeitos da utilização de substâncias aliviadoras de estresse em plantas sob estresse hídrico, é necessário também análises bioquímicas para verificarmos se as plantas absorveram efetivamente as

substâncias aplicadas, análises reprodutivas para averiguar o impacto do DH no abortamento floral, germinação e viabilidade dos grãos de pólen. E por fim se faz necessário também realizar análise de produções, para complementar as análises biométrica e concluir se de fato essas substâncias e o DH impactaram na produção final.



**Figura 4:** Massa seca do caule (A); massa seca da folha (B); número de ramos (C); diâmetro do caule (D); número de folhas (E); altura da planta (F); número de nós (G) de plantas de soja (*Glycine max (L.) Merril*) submetidas as seguintes condições: 90% da CC (controle) e 50% da

CC (déficit hídrico), onde F0 é aplicações de água, F1 (30 mM de prolina, 15 mM de glicina-betaína, 300  $\mu$ M de nitroprussiato de sódio (SNP) e 1 L ha<sup>-1</sup> de fosfito de potássio), F2 (45 mM de prolina, 22,5 mM de glicina-betaína, 450  $\mu$ M de SNP e 1,5 L ha<sup>-1</sup> de fosfito de potássio), e F3 (60 mM de prolina, 30 mM de glicina-betaína, 600  $\mu$ M de SNP e 2 L ha<sup>-1</sup> de fosfito de potássio). Médias com letras maiúsculas comparam as CC dentro de uma formulação e letras minúsculas comparam as formulações em cada CC. Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Os dados são média  $\pm$  EP ( $n=5$  e  $n=20$ ).

## 7. CONCLUSÃO

Apesar de vários estudos concluírem que a aplicação exógena de óxido nítrico, prolina, glicina-betaína e fosfito de potássio de forma isoladas amenizam os efeitos do estresse hídrico, quando combinados, essas substâncias não aumentaram a tolerância das plantas de soja neste estudo.

As plantas de soja apresentaram uma regulação estomática efetiva o que aumentou a eficiência no uso da água, porém impactou negativamente os parâmetros fotossintéticos e biométricos, mesmo com a aplicação de substâncias aliviadoras de estresse. Para avaliarmos melhor os impactos na produção são necessários também avaliações de reprodução e produtividade.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELAAL, K. A., HAFEZ, Y. M., EL SABAGH, A., & SANEOKA, H. Ameliorative effects of Abscisic acid and yeast on morpho-physiological and yield characteristics of maize plant (*Zea mays* L.) under water deficit conditions. **Fresenius Environmental Bulletin**, v.26 n.12, p7372-7383, 2017.
- ABDELAAL, K. A., ATTIA, K. A., ALAMERY, S. F., EL-AFRY, M. M. Exogenous application of proline and salicylic acid can mitigate the injurious impacts of drought stress on barley plants associated with physiological and histological characters. **Sustainability**, v.12 n.5, p.1736, 2020.
- AKRAM, N.A., IQBAL, M., MUHAMMAD, A. et al. Aminolevulinic acid and nitric oxide regulate oxidative defense and secondary metabolisms in canola (*Brassica napus* L.) under drought stress. **Protoplasma** v.255, p.163–174, 2018.
- ALMEIDA, G. M., SILVA, A. A., BATISTA, P. F., MOURA, L. M. F. et al. Hydrogen sulfide, potassium phosphite and zinc sulfate as alleviators of drought stress in sunflower plants. **Ciência e Agrotecnologia**, v.44, 2020.
- ALMEIDA, G. M., COSTA, A. C., BATISTA, P. F., JUNQUEIRA, V. B. et al., Can light intensity modulate the physiological, anatomical, and reproductive responses of soybean plants to water deficit? **Physiologia Plantarum**. v.172, p.1301-1320, 2021.
- ALTUNTAŞ, C., DEMIRALAY, M., SEZGIN MUSLU, A., & TERZI, R. Proline-stimulated signaling primarily targets the chlorophyll degradation pathway and photosynthesis associated processes to cope with short-term water deficit in maize. **Photosynthesis Research**, v.144 n.1, p.35-48, 2020.
- ALVES, L. M. CHADWICK, R., MOISE, A. et al. Assessment of rainfall variability and future change in Brazil across multiple timescales. **International Journal of Climatology**, v. 41, p. E1875-E1888, 2021.
- AMOAH, J. N.; KO, C. S., YOON, J. S., & WEON, S. Y. Effect of drought acclimation on oxidative stress and transcript expression in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Journal of Plant Interactions**, v.14, n.1, p.492-505, 2019.
- ARO, E. M., MCCAFFERY, S., & ANDERSON, J. M. Photoinhibition and D1 protein degradation in peas acclimated to different growth irradiances. **Plant Physiology**, v.103, n.3, p.835-843, 1993.
- ASMA, M., SHAHBAZ, M. & AKRAM, N.A. Influence of exogenously applied glycine betaine on growth and gas exchange characteristics of maize (*Zea mays* L.) **Pak. J. Agr. Sci.** v.43 n.1-2 p.1044-1054, 2006.
- BARRS, H. D., WEATHERLEY, P. E. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. **Australian journal of biological sciences**, v.15, n.3, p.413-428, 1962.
- BAKER N.R., ROSENQVIST E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. **Journal of Experimental Botany**, v.55, p.1607–1621, 2004.

BATISTA, P. F., COSTA, A. C., MÜLLER, C., OLIVEIRA S.F., R. Nitric oxide mitigates the effect of water deficit in *Crambe abyssinica*. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.129, p.310-322, 2018.

BATISTA, P. F. et al. Biochemical and physiological impacts of zinc sulphate, potassium phosphite and hydrogen sulphide in mitigating stress conditions in soybean. **Physiologia Plantarum**, v.168, p.456–472, 2019

BILGER W, SCHREIBER U, BOCK M. Determination of the quantum efficiency of photosystem II and of non-photochemical quenching of chlorophyll fluorescence in the field. **Oecologia**, v.102, p.425-432, 1995.

CASTIGLIONI, P., BELL, E., LUND, A., ROSENBERG, A. F. et al. Identification of GB1, a gene whose constitutive overexpression increases glycinebetaine content in maize and soybean. **Plant Direct**, v.2 n.2, e00040, 2018.

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

DĄBROWSKI, P., BACZEWSKA-DĄBROWSKA, A. H., KALAJI, H. M., GOLTSEV, V. Exploration of chlorophyll a fluorescence and plant gas exchange parameters as indicators of drought tolerance in perennial ryegrass. **Sensors**, v.19, n.12, p.2736, 2019.

DOLFERUS, Rudy; PACINI, Ettore. Pollen developmental arrest: maintaining pollen fertility in a world with a changing climate? **Frontiers in plant science**, v.10, p.679, 2019.

DOMINGOS, P., PRADO, A. M., WONG, A., GEHRING, C., & FEIJO, J. A. Nitric oxide: a multitasked signaling gas in plants. **Molecular plant**, v.8, p.506-520, 2015.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Brasil é o quarto maior produtor de grãos e o maior exportador de carne bovina do mundo**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/62619259/brasil-e-o-quarto-maior-produtor-de-graos-e-o-maior-exportador-de-carne-bovina-do-mundo-diz-estudo>. Acesso em 12 de junho de 2021.

ESCALANTE M., C., AGUILAR C., L. F., ECHEVARRÍA M., I., MEDINA L., F. et al., Contribution of glycine betaine and proline to water deficit tolerance in pepper plants. **HortScience**, v.54 n.6, p.1044-1054, 2019.

GENTY B., BRIANTAIS J. M., BAKER N. R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. **Biochimica et Biophysica Acta**, v.990, p.87-92, 1989.

GORGINI S. H., KHORASANINEJAD, S., SOLTANLOO, H., & SHARIATI V. Physiological response and secondary metabolites of three lavender genotypes under water deficit. **Scientific reports**, v.11, n.1, p.1-22, 2021.

GOMAA, M. A., KANDIL, E. E., EL-DEIN, A. A. Z. et al. Increase maize productivity and water use efficiency through application of potassium silicate under water stress. **Scientific Reports**, v.11, p.1-8. 2021.

HABIB, N., ALI, Q., ALI, S., JAVED, M. T. et al. Use of nitric oxide and hydrogen peroxide for better yield of wheat (*Triticum aestivum L.*) under water deficit conditions: growth, osmoregulation, and antioxidative defense mechanism. **Plants**, v.9, n.2, p.285, 2020.

HASANUZZAMAN, M., NAHAR, K., HOSSAIN, M. S., ANEE, T. I., PARVIN, K., & FUJITA, M. Nitric oxide pretreatment enhances antioxidant defense and glyoxalase systems to confer PEG-induced oxidative stress in rapeseed. **Journal of Plant Interactions**, v.12, p.323-331, 2017.

HATFIELD, J. L., & DOLD, C. Water-use efficiency: advances and challenges in a changing climate. **Frontiers in plant science**, v.10, p.103, 2019.

HINOJOSA, L., MATANGUIHAN, J. B., & MURPHY, K. M. Effect of high temperature on pollen morphology, plant growth and seed yield in quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*). **Journal of agronomy and crop science**, v.205, p.33-45, 2019.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **LSPA - Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistemico-da-producao-agricola.html?=&t=destaques>. Acesso em: 12 de junho de 2021.

ILYAS, M., NISAR, M., KHAN, N., HAZRAT, A., et al., Drought tolerance strategies in plants: a mechanistic approach. **Journal of Plant Growth Regulation**, v.40 n.3, p.926-944, 2021.

LAWSON, T., & VIALET-CHABRAND, S. Speedy stomata, photosynthesis and plant water use efficiency. **New Phytologist**, 221(1), 93-98, 2019.

LEITE, S. R., NASCIMENTO, M. N., TANAN, T. T., NETO, L. P. G. Alleviation of water deficit in *Physalis angulata* plants by nitric oxide exogenous donor. **Agricultural Water Management**, v.216, p.98-104, 2019.

LIU, B., LIANG, J., TANG, G., WANG, X., et al., Drought stress affects on growth, water use efficiency, gas exchange and chlorophyll fluorescence of Juglans rootstocks. **Scientia horticultrae**, v.250, p.230-235. 2019.

MA, D., SUN, D., WANG, C., DING, H. et al. Physiological responses and yield of wheat plants in zinc-mediated alleviation of drought stress. **Frontiers in plant science**, v.8, p.860, 2017.

MAMNABI, S., NASROLLAHZADEH, S., GHASSEMI-GOLEZANI, K., & RAEI, Y. Improving yield-related physiological characteristics of spring rapeseed by integrated fertilizer management under water deficit conditions. **Saudi journal of biological sciences**, v.27, p.797-804, 2020.



MILHORANCE, C., SABOURIN, E., CHECHI, L., & MENDES, P. The politics of climate change adaptation in Brazil: framings and policy outcomes for the rural sector. **Environmental Politics**, v.31, n.2, p.183-204, 2022.

MONTZKA, S. A., DLUGOKENCKY, E. J., & BUTLER, J. H. Non-CO2 greenhouse gases and climate change. **Nature**, v.476 n.7358, p.43-50, 2011.

NAIDOO, G., & NAIDOO, K. K. Drought stress effects on gas exchange and water relations of the invasive weed *Chromolaena odorata*. **Flora**, v.248, p.1-9, 2018.

OYARBURO, N.S., MACHINANDIARENA, M.F., FELDMAN, M.L., DALEO, G.R. Potassium phosphite increases tolerance to UV-B in potato. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.88, p.1-8, 2015.

RAJABI, A., EHSANZADEH, P., RAZMJOO, J. Partial Relief of Drought-Stressed Fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) in Response to Foliar-Applied Zinc. **Pedosphere**, v.29, n.6, p.752-763, 2019.

REZAYIAN, M., EBRAHIMZADEH, H. & NIKNAM, V. Nitric Oxide Stimulates Antioxidant System and Osmotic Adjustment in Soybean Under Drought Stress. **J Soil Sci Plant Nutr** v.20, p.1122–1132, 2020.

SULTANA, S. NASER, H. Á., SHIL, N. C. et al. Effect of foliar application of zinc on yield of wheat grown by avoiding irrigation at different growth stages. **Bangladesh Journal of Agricultural Research**, v.41, n.2, p.323-334, 2016.

RAZA, S., FARRUKH S. M., MUSTAFA S. G., JAMIL, M et al., Potassium applied under drought improves physiological and nutrient uptake performances of wheat (*Triticum Aestivum L.*). **Journal of soil science and plant nutrition**, v.13, p.175-185, 2013.

SADAK, M. S., EL-BASSIOUNY, H. M. S., & DAWOOD, M. G. Role of trehalose on antioxidant defense system and some osmolytes of quinoa plants under water deficit. **Bulletin of the National Research Centre**, v.43, p.5, 2019.

SCHOLANDER P. F.; HAMMEL H.T.; BRADSTREET E.D.; HEMINGSEN E.A. Sap pressure in vascular plants. **Science**, v.148, p.339 – 345, 1965.

SHAFIQ, S., AKRAM, N. A., ASHRAF, M., AL-HARBI, M. S., & Samra, B. N. Sugar beet extract rich in glycine betaine modulates oxidative defense system and key physiological characteristics of maize under water-deficit stress. **Plos one**, v.16, n.11, e0254906, 2021.

SINGH, J., & THAKUR, J. K. Photosynthesis and abiotic stress in plants. In Biotic and abiotic stress tolerance in plants. **Springer, Singapore**, p. 27-46, 2018.

SOUSA, L. F., MENEZES-SILVA, P. E., LOURENÇO, L. L., GALMÉS, J., GUIMARÃES, A. C. et al. Improving water use efficiency by changing hydraulic and stomatal characteristics in soybean exposed to drought: the involvement of nitric oxide. **Physiologia plantarum**, v.168, p.576-589, 2020.

SULEIMAN, S.O., HABILA, D.G., MAMADOU, F., ABOLANLE, B.M., & OLATUNBOSUN, A.N. Grain yield and leaf gas exchange in upland NERICA rice under repeated cycles of water deficit at reproductive growth stage. **Agricultural Water Management**, v.264, p.107507. 2022.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 888 p. 2017.

TARIQ, A. PAN, K., OLATUNJI, O. A., GRACIANO, C., et al. Phosphorous fertilization alleviates drought effects on *Alnus cremastogyne* by regulating its antioxidant and osmotic potential. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 5644, 2018.

TEIXEIRA, W. F., SOARES, L. H., FAGAN, E. B., COSTA M., S., et al. Amino acids as stress reducers in soybean plant growth under different water-deficit conditions. **Journal of plant growth regulation**, v.39 n.2, p.905-919, 2020.

TISARUM, R., THEERAWITAYA, C., SAMPHUMHUNG, T., TAKABE, T., Exogenous foliar application of glycine betaine to alleviate water deficit tolerance in two Indica rice genotypes under greenhouse conditions. **Agronomy**, v.9, n.3, p.138, 2019.

URBAN, L., AARROUF, J., & BIDEL, L. P. Assessing the effects of water deficit on photosynthesis using parameters derived from measurements of leaf gas exchange and of chlorophyll a fluorescence. **Frontiers in plant science**, 8, 2068, 2017.

USDA, U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Oil Crops Sector at a Glance**. Disponivel em: <https://www.ers.usda.gov/topics/crops/soybeans-oil-crops/oil-crops-sector-at-a-glance/>. Acesso em: 12 de junho de 2021.

YAVAS, I and UNAY, A. Effects of zinc and salicylic acid on wheat under drought stress. **J Anim Plant Sci**, v.26, p.1012-1018, 2016.

ZAHOOR, R., ZHAO, W., ABID, M., DONG, H. et al. Potassium application regulates nitrogen metabolism and osmotic adjustment in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) functional leaf under drought stress. **Journal of plant physiology**, v. 215, p.30-38, 2017.

WANI, A. S., AHMAD, A., HAYAT, S., & TAHIR, I. Epibrassinolide and proline alleviate the photosynthetic and yield inhibition under salt stress by acting on antioxidant system in mustard. **Plant physiology and biochemistry**, v.135, p.385-394, 2019.

WELLBURN A.R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**, v.144 p.307-313, 1994.

## 9. ANEXOS

**Tabela 2:** Teores de clorofila a (Cla), Clorofila b (Clb), carotenoides (Carot), clorofilas totais (CI total) e taxa de extravasamento de eletrólitos (TLE) de plantas de soja (*Glycine max (L.) Merrill*) submetidas as seguintes condições: 90% da CC (controle) e 50% da CC (déficit hídrico), onde F0 é aplicações de água, F1 (30 mM de prolina, 15 mM de glicina-betaína, 300 µM de nitroprussiato de sódio (SNP) e 1 L ha<sup>-1</sup> de fosfito de potássio), F2 (45 mM de prolina, 22,5 mM de glicina-betaína, 450 µM de SNP e 1,5 L ha<sup>-1</sup> de fosfito de potássio), e F3 (60 mM de prolina, 30 mM de glicina-betaína, 600 µM de SNP e 2 L ha<sup>-1</sup> de fosfito de potássio).

Tratamento	Cla	Clb	Carot	CI total	TLE
CONT + F0	37,8 ± 2,4ns	11,4 ± 0,6ns	7,3 ± 0,4ns	49,2 ± 3,0ns	26,4 ± 2,1ns
DH + F0	35,3 ± 1,9ns	11,4 ± 0,8ns	7,1 ± 0,5ns	4,7 ± 2,8ns	24,1 ± 1,1ns
CONT + F1	35,9 ± 2,6ns	13,5 ± 1,9ns	7,2 ± 0,5ns	49,4 ± 3,9ns	29,3 ± 1,4ns
DH + F1	40,5 ± 3,0ns	13,2 ± 0,9ns	7,6 ± 0,6ns	53,7 ± 4,0ns	25,4 ± 1,6ns
CONT + F2	40,2 ± 0,5ns	13,2 ± 0,3ns	7,6 ± 0,1ns	53,5 ± 0,6ns	27,0 ± 1,2ns
DH + F2	40,5 ± 2,5ns	13,0 ± 0,9ns	7,6 ± 0,4ns	53,5 ± 3,5ns	25,8 ± 1,3ns
CONT + F3	39,5 ± 2,2ns	12,1 ± 0,6ns	7,6 ± 0,4ns	51,7 ± 2,8ns	28,2 ± 2,1ns
DH + F3	38,4 ± 1,6ns	12,2 ± 0,5ns	7,2 ± 0,3ns	50,7 ± 2,0ns	28,8 ± 0,3ns

Os dados são média ± EP ( $n=05$ ). ns: não houve diferença significativa, pelo Teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).