



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DO
MARANHÃO



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
AGROECOLOGIA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOLOGIA

MARIA RITA DA SILVA ANDRADE LEONEL

**EFEITOS DOS FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES SOBRE OS
PARÂMETROS FISIOLÓGICOS E DE CRESCIMENTO DO MILHO SOB DÉFICIT
HÍDRICO**

São Luís, MA

2024



MARIA RITA DA SILVA ANDRADE LEONEL

**EFEITOS DOS FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES SOBRE OS
PARÂMETROS FISIOLÓGICOS E DE CRESCIMENTO DO MILHO SOB DÉFICIT
HÍDRICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agroecologia da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, como parte das exigências para a obtenção do título de mestre em Agroecologia.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Massi Ferraz.
Coorientadora: Prof^a Dr^a Camila Pinheiro Nobre

São Luís, MA

2024



Leonel, Maria Rita da Silva Andrade

Efeitos dos fungos micorrízicos arbusculares sobre os parâmetros fisiológicos e de crescimento do milho sob déficit hídrico. / Maria Rita da Silva Andrade Leonel. – São Luis, MA, 2024.

... f

Dissertação (Mestrado em Agroecologia) – Universidade Estadual do Maranhão, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Massi Ferraz

1.Fluorescência da clorofila *a*. 2.*Rizhoglomus clarum*. 3.Restrição

Elaborado por Cássia Diniz- CRB 13/910


MARIA RITA DA SILVA ANDRADE LEONEL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agroecologia da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, como parte das exigências para a obtenção do título de mestre em Agroecologia.


Orientador: Prof. Dr. Tiago Massi Ferraz.
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Camila Pinheiro Nobre

Aprovado em: 26/03/2024


Comissão Julgadora:

Documento assinado digitalmente
 TIAGO MASSI FERRAZ
Data: 11/03/2025 17:16:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Tiago Massi Ferraz (Orientador)
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

Documento assinado digitalmente
 FABRICIO DE OLIVEIRA REIS
Data: 12/03/2025 15:29:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fabrício de Oliveira Reis (Membro)
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

Documento assinado digitalmente
 WEVERTON PEREIRA RODRIGUES
Data: 13/03/2025 16:52:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Weverton Pereira Rodrigues (Membro)
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão - UEMASUL

São Luís, MA

2024



A Deus, por ter me dado saúde, sabedoria, e por ter me guiado nessa jornada. A minha família pelo amor incondicional, meus amigos, professores, e todos aqueles que fizeram parte da realização deste sonho e objetivo.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde, sabedoria, e por ter me guiado nessa jornada de dois anos de Mestrado.

À minha família: Meu esposo Léo Vieira Leonel, minha filha Leandra Andrade Leonel, meus pais Maria Lucia da Silva e Antônio Ferreira de Andrade e a todos meus irmãos, pelo amor incondicional e pela compreensão de toda essa ausência durante a concretização do mestrado.

À Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) e ao Programa de Pós-graduação em Agroecologia pela oportunidade da realização do curso.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo, suporte financeiro por mim recebido, durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Tiago Massi Ferraz pela condução na caminhada, ajuda e pelo exemplo de profissional ético.

À minha Coorientadora, Camila Nobre, por toda ajuda durante essa jornada.

Ao Laboratório de Ciências Ambientais e Biodiversidade – UEMA, aos amigos, colegas e aos professores de trabalho pela convivência e toda ajuda na realização da pesquisa (Patrick, Diego, Vinicius, Izadora, Jailma, Sebastião, Danielle, Joudellys, Cristiele, Glaucia e Davi)

Gostaria de agradecer imensamente à minha amiga Niedja por tudo que fez e continua fazendo por mim, por sua amizade verdadeira e inestimável. Agradeço por estar sempre presente para me ajudar, pelas madrugadas de sono perdidas em meu auxílio e por cada abraço reconfortante que compartilhamos.

Agradeço a todos que contribuíram na construção da pesquisa de forma direta ou indiretamente.

Muito obrigada!



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DO
MARANHÃO



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
AGROECOLOGIA

"Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais inteligente. Quem sobrevive é o mais disposto à mudança."

Charles Darwin.

RESUMO

As plantas podem ser expostas a diversas condições e estresses, sendo o déficit hídrico (DH) um dos mais significativos para a produção do milho, uma vez que pode causar mudanças fisiológicas e de crescimento na planta. Uma das estratégias para mitigar os efeitos negativos do DH é a utilização dos fungos micorrízicos arbusculares (FMA) que conferem maior capacidade de aclimatação a condições de DH, uma vez que possibilitam maior absorção de água e nutrientes, como o fósforo e nitrogênio. O objetivo deste trabalho foi avaliar as respostas das características de fluorescência da clorofila *a* e de crescimento em plantas de milho submetidas ao déficit hídrico e inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares (FMA). O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Programa de Pós-graduação em Agroecologia da Universidade Estadual do Maranhão, localizada em São Luís/MA, durante o período de setembro a novembro de 2023. O solo utilizado foi coletado em uma área com vegetação preservada na Fazenda Escola da Universidade Estadual do Maranhão. Foram utilizadas sementes de milho híbrido AG1051, de ciclo precoce. Para a inoculação do solo nos tratamentos de FMA foi utilizada a espécie identificada *Rhizoglosum clarum*, adquirida do banco de germoplasma da Embrapa Agrobiologia (Seropédica, RJ). O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com esquema fatorial 4 (solo estéril; natural; estéril + *R. clarum*; natural + *R. clarum*) x 2 (irrigado e déficit hídrico), e quatro repetições, totalizando 32 parcelas experimentais. Cada parcela foi representada por um vaso com capacidade de 20 L, e uma planta por vaso. O experimento foi conduzido por 51 dias, até a fase V5-V6. As variáveis meteorológicas foram monitoradas ao longo do dia, e a umidade do solo foi mantida em 90% da capacidade de campo (CC) até os 46 dias após o plantio, quando ocorreu a restrição hídrica e as plantas dos tratamentos sob estresse foram mantidas a 20% da CC. De acordo com os resultados, o déficit hídrico reduziu significativamente a altura das plantas, o diâmetro do colmo, a área foliar, a massa foliar específica, a massa fresca das folhas e do colmo, bem como a massa seca das folhas, do colmo e das raízes. A inoculação com *Rizhoglosum clarum* em solo natural mitigou alguns desses efeitos negativos, resultando em maiores valores para as variáveis de crescimento em comparação ao solo estéril sob estresse hídrico. Em condição irrigada a inoculação com *R. clarum* e solo natural tiveram maior biomassa quando comparado com tratamento estéril. A inoculação com FMAs teve um impacto significativo na fluorescência da clorofila *a*. Além disso, observou-se níveis mais altos de carotenoides, tanto em condições de déficit hídrico quanto em condições irrigadas, em comparação com o tratamento estéril. Esses resultados indicam que a aplicação de FMAs teve um efeito sinérgico nas plantas de milho, influenciando processos fisiológicos e bioquímicos.

Palavras-chave: Fluorescência da clorofila *a*, *Rizhoglosum clarum*, Restrição hídrica, *Zea mays*. L.

ABSTRACT

Plants can be exposed to various conditions and stresses, with water deficit (WD) being one of the most significant for maize production, as it can cause physiological and growth changes in the plant. One strategy to mitigate the negative effects of WD is the use of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), which provide greater acclimation capacity to WD conditions by enabling increased water and nutrient absorption, such as phosphorus and nitrogen. The aim of this study was to evaluate the responses of chlorophyll *a* fluorescence characteristics and growth in maize plants subjected to water deficit and inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). The experiment was conducted in a greenhouse at the Postgraduate Program in Agroecology of the State University of Maranhão, located in São Luís/MA, from September to November 2023. The soil used was collected from a preserved vegetation area at the University's School Farm. Hybrid maize seeds AG1051, with an early cycle, were used. For soil inoculation in the AMF treatments, the species identified as *Rhizoglyphus clarum*, acquired from the Embrapa Agrobiologia germplasm bank (Seropédica, RJ), was used. The experimental design was in randomized blocks, with a factorial scheme of 4 (sterile soil; natural soil; sterile soil + *R. clarum*; natural soil + *R. clarum*) x 2 (irrigated and water deficit), and four replications, totaling 32 experimental plots. Each plot was represented by a 20 L capacity pot, with one plant per pot. The experiment lasted for 51 days, until the V5-V6 stage. Meteorological variables were monitored throughout the day, and soil moisture was maintained at 90% of field capacity (FC) until 46 days after planting, when water restriction occurred, and stressed treatments were maintained at 20% of FC. According to the results, water deficit significantly reduced plant height, stem diameter, leaf area, specific leaf mass, fresh leaf and stem mass, as well as dry leaf, stem, and root mass. Therefore, inoculation with *Rhizoglyphus clarum* in natural soil mitigated some of these negative effects, resulting in higher growth values compared to sterile soil under water stress. Under irrigated conditions, inoculation with *R. clarum* and natural soil had higher biomass compared to the sterile treatment. Inoculation with AMF had a significant impact on chlorophyll *a* fluorescence. Additionally, higher levels of carotenoids were observed, both under water deficit and irrigated conditions, compared to the sterile treatment. These results indicate that the application of AMF had a synergistic effect on maize plants, influencing physiological and biochemical processes.

Keywords: Chlorophyll *a* fluorescence, *Rhizoglyphus clarum*, Water restriction, *Zea mays*. L.



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1 Cultura do milho (<i>Zea mays</i> L.).....	19
2.2 Déficit hídrico em plantas de milho	21
2.3 Uso de FMA na mitigação do déficit hídrico em plantas	22
2.4 Parâmetros Fisiológicos.....	24
3 OBJETIVOS	27
3.1 Objetivo Geral.....	27
3.2 Objetivos Específicos	27
4 MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1 Área de estudo e material vegetal.....	28
4.2 Inoculação de Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA).....	28
4.3 Design experimental	29
4.4 Variáveis analisadas	32
4.4.1 Análises de crescimento e biomassa.....	32
4.4.2 Área foliar.....	32
4.4.3 Massa foliar específica (MFE)	32
4.4.4 Conteúdo relativo de água (CRA)	33
4.4.5 Água da Parte Aérea -APA (g H ₂ O).....	33
4.4.6 Teor de prolina	33
4.4.7 Carboidratos solúveis totais.....	34
4.4.8 Índice de Intensidade de verde	34
4.4.9 Fluorescência da clorofila <i>a</i>	35
4.4.10 Os teores de pigmentos fotossintéticos.....	35
4.5. Análises estatísticas.....	35
5 RESULTADOS	37
6 DISCUSSÃO	53
7 CONCLUSÕES.....	58
REFERÊNCIAS	59

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Experimento instalado em casa de vegetação em São Luís/MA.....30
- Figura 2** – Dados climáticos coletados durante o período experimental, setembro/2023 a novembro/2023. **A**- Temperatura máxima (T máx), média (T méd) e mínima (T mín); e Umidade relativa máxima (UR máx), média (UR méd) e mínima (UR mín). **B**- Déficit de pressão de vapor máximo (DPV máx), média (DPV méd) e mínima (DPV mín) e Radiação fotossinteticamente ativa máxima (RFA máx), média (RFA méd) e mínima (RFA mín). A seta preta indica a data do plantio; as setas branca e cinza indicam o início e final do período do déficit hídrico, respectivamente.....31
- Figura 3** – Identificação de Espécies de Fungos Micorrízicos Arbusculares do solo nativo utilizado no experimento. *Acaulospora morrowiae* (A), *Glomus* sp1 (B), *Glomus* sp1 (C), *Acaulospora morrowiae* (D), *Acaulospora morrowiae* (E), *Glomus* sp1 (F), *Glomus* sp2 (G), *Acaulospora scrobiculata* (H), *Acaulospora foveata* (I), *Glomus* sp2 (J), *Glomus* sp 4 (K), *Ambispora apendicula* (L), *Glomus* sp2 (M), *Glomus* sp2 (N), *Glomus* sp3 (*glomerulatum*) (O).....37
- Figura 4** - Altura de plantas de milho irrigadas (**A**) e sob déficit hídrico (**B**) com inoculação de FMA (n = 4). IR: irrigados, DH: déficit hídrico; NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglosum clarum*.....39
- Figura 5** - Diâmetro do colmo de plantas de milho irrigadas (**A**) e sob déficit hídrico (**B**) com inoculação de FMA (n = 4). IR: irrigados, DH: déficit hídrico; NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglosum clarum*.....40
- Figura 6** - Área foliar de plantas de milho pela manhã irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglosum clarum* Médias seguidas pelas mesmas letras entre os tratamentos no dia de avaliação não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). ns: não significativo. Cada coluna representa a média ± erro padrão (n = 4)41
- Figura 7** - Massa foliar específica de plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglosum clarum* Médias seguidas pelas mesmas letras entre os tratamentos no dia de avaliação não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). Cada coluna representa a média ± erro padrão (n = 4)41
- Figura 8** - Massa fresca da folha (**A**) e colmo (**B**) de plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglosum clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras entre os tratamentos no dia de avaliação não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%)42
- Figura 9** - Massa seca da folha (**A**), colmo (**B**) e raiz (**C**) de plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglosum clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras entre os tratamentos no

dia de avaliação não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). Cada coluna representa a média \pm erro padrão (n = 4)43

Figura 10 - Conteúdo relativo de água de plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras entre os tratamentos no dia de avaliação não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). Cada coluna representa a média \pm erro padrão (n = 4)44

Figura 11 - Índice de Intensidade de verde de plantas de milho (manhã e tarde) irrigada e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras entre os tratamentos no dia de avaliação não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). ns: não significativo. Cada coluna representa a média \pm erro padrão (n = 4)44

Figura 12 – Água da Parte Aérea em plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). Cada coluna representa a média \pm erro padrão (n = 4)45

Figura 13 - Conteúdo de prolina em plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). Cada coluna representa a média \pm erro padrão (n = 4)46

Figura 14 - Conteúdo de carboidrato em plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). Cada coluna representa a média \pm erro padrão (n = 4)47

Figura 15 - Eficiência primária (Fv/F0) de plantas de milho (manhã e tarde) irrigada e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras entre os tratamentos no dia de avaliação não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). ns: não significativo. Cada coluna representa a média \pm erro padrão (n = 4)48

Figura 16 - Eficiência quântica máxima do fotossistema II (Fv/Fm) de plantas de milho (manhã e tarde) irrigada e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras entre os tratamentos no dia de avaliação não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). ns: não significativo. Cada coluna representa a média \pm erro padrão (n = 4)49

Figura 17 - Índice de desempenho (PI_{ABS}) de plantas de milho (manhã e tarde) irrigada e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras entre os tratamentos no dia de avaliação não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). ns: não significativo. Cada coluna representa a média \pm erro padrão (n = 4)50

Figura 18 - Conteúdo de carotenoides em plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO:



Rizhoglomus clarum. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). Cada coluna representa a média \pm erro padrão (n = 4)51

Figura 19 – Análises de Componentes Principais (PCA) em plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Prol: Prolina, APA: Água da Parte Aérea, Carot: Carotenoide, MFE: Massa Foliar Específica, CRA: Conteúdo Relativo de água, MFF: Massa Fresca Foli: Carb: Carboidrato, Diam: Diâmetro, MFC: Massa Fresca do Colmo, Alt: Altura, MSR: Massa Seca das Raízes, MSF: Massa Seca da Folha, MSC: Massa Seca do Colmo. (n = 4)52



LISTA DE QUADRO

Quadro 1 - Códigos e descrição dos tratamentos do experimento com milho e inoculação de FMA, em São Luís/MA.....	29
---	----



LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- AF: Área foliar
AP: Altura das plantas
APA: Água da parte aérea
Cav: Capacidade de armazenamento de água no vaso
CC: Capacidade de campo
CF: Comprimento da folha
CRA: Conteúdo relativo de água
DADH: Dias após o déficit hídrico
DAP: Dias após o plantio
DH: Déficit hídrico
DPV: Déficit de pressão de vapor
F₀: Fluorescência inicial
F_m: Fluorescência máxima da clorofila a
FMA: Fungo micorrízico arbuscular
FSII: Fotossistema II
F_v/F₀: Eficiência primária
F_v/F_m: Rendimento quântico máximo do FSII
F_v: Fluorescência variável
IR: irrigados
LF: Largura máxima da folha
Lps: Leitura do peso seco
Lpu: Leitura do peso úmido
MF: Massa fresca
MFC: Massa fresca do colmo
MFF: Massa fresca de folhas
MSC: Massa seca do colmo
MSF: Massa seca de folhas
MSR: Massa seca das raízes
MT: Massa túrgida
NAT: solo natural
PI_{ABS}: Índice de fotossintético na base de absorção



PS: Peso seco

PU: Peso úmido

RIZHO: *Rizhoglomus clarum*

Rubisco: Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase

T: Temperatura

UR: Umidade relativa

1 INTRODUÇÃO

A cultura do milho (*Zea mays* L.) é amplamente difundida em todo o mundo, sendo os maiores produtores os Estados Unidos, China e Brasil (USDA, 2022). No Brasil, estados como Mato Grosso, Bahia, Maranhão, Goiás e Minas Gerais se destacam na produção de milho devido à boa adaptabilidade da cultura nessas áreas (CONAB, 2023). Além de sua importância na alimentação humana, o milho desempenha um papel significativo no agronegócio brasileiro, tanto no mercado nacional quanto no internacional, sendo essencial na produção de biocombustíveis, rações e bebidas (Oliveira *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2021).

Devido à relevância econômica e à elevada demanda de milho pela indústria, é necessário aumentar a produção (Qaswar *et al.*, 2020). No entanto, as alterações nos padrões climáticos, tais como a seca e o estresse térmico, têm sido limitantes para a produção da cultura. A seca prolongada ocasiona uma baixa disponibilidade hídrica nas regiões produtoras de milho, levando à redução da produção de grãos (Ren *et al.*, 2019). A limitação hídrica afeta o sistema fisiológico vegetal, o que pode prejudicar diversos mecanismos do metabolismo da planta (*e.g.* fotossíntese, transpiração, condutância estomática, translocação de fotoassimilados), que reflete diretamente no desenvolvimento e na produtividade (Liu *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2020; Verma *et al.*, 2021).

O déficit hídrico desencadeia a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) nas plantas, resultando em dano oxidativo, degradação de membranas e desnaturação de proteínas. Para combater os efeitos nocivos das EROs, as plantas ativam mecanismos de defesa antioxidante, envolvendo enzimas como catalase, superóxido dismutase e peroxidase, além de compostos não enzimáticos como ascorbato, glutatona, β -caroteno e alfa-tocoferol (Abdelaal *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2020; Verma *et al.*, 2021). Além disso, as plantas fecham os estômatos para reduzir a perda de água, porém, isso limita a assimilação de CO₂, afetando a síntese de ATP e reduzindo a eficiência fotossintética, incluindo a redução da atividade e quantidade da enzima ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco) (Hura *et al.*, 2007; Carmo-Silva *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2020). Como estratégia de defesa adicional, a simbiose com microrganismos do solo é destacada como uma forma de aumentar a tolerância das plantas a condições adversas, como a seca e a escassez de nutrientes minerais (Kobae, 2019; Gholinezhad *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2020).

Dentre os microrganismos presentes e benéficos do solo tem-se os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), pertencentes ao filo Glomeromycota (Tederso *et al.*, 2018), que são microrganismos benéficos do solo com ocorrência cosmopolita e uma ampla gama de

simbiontes vegetais (Stürmer; Bever; Morton, 2018). Na simbiose micorrízica, as plantas transferem carbono produzido pela fotossíntese para os fungos, recebendo em troca água, fósforo (P), cálcio (Ca), zinco (Zn), manganês (Mn) e outros elementos minerais essenciais para seu crescimento, absorvidos pela interação entre raízes e hifas dos FMAs (Gomes Júnior *et al.*, 2018; Kobae, 2019). Além de auxiliarem na nutrição mineral, acredita-se que os FMAs conferem proteção às plantas contra efeitos abióticos e bióticos (Brundrett; Tedersoo, 2018; Moreira *et al.*, 2019).

A associação entre plantas e fungos micorrízicos arbusculares confere maior capacidade de aclimatação a condições de déficit hídrico, permitindo maior absorção de água e nutrientes essenciais, como fósforo e nitrogênio (Parniske, 2008; Kobae, 2019; Chen *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020). Além disso, essa simbiose pode contribuir para a adaptação a outras condições ambientais extremas, como aumento da radiação e estresse por salinidade (Xu; Lu; Tong, 2018; Langeroodi *et al.*, 2020; Zou; Wu; Kuča, 2021). Estudos em plantas de milho demonstraram que a micorrização com *Funneliformis mosseae* retardou os efeitos negativos do déficit hídrico, melhorou a atividade das enzimas antioxidantes, reduziu o acúmulo de ácido abscísico e, conseqüentemente, diminuiu a formação de EROs, otimizando o crescimento e a biomassa das plantas, tornando-as mais tolerantes a diferentes estresses abióticos (Ren *et al.*, 2019; Ahraminia *et al.*, 2020).

Diante do exposto, a inoculação de FMA é uma tecnologia com potencial de aumentar a produtividade e mitigar os danos causados pela seca. Além disso, apresenta-se como uma estratégia inovadora e sustentável para os agricultores maranhenses pela facilidade de aplicação e custo-benefício. Portanto, o estudo foi baseado na hipótese que a inoculação de FMA mitiga o efeito do déficit hídrico, melhora a eficiência fotoquímica e o crescimento de plantas de milho durante o estágio vegetativo. Assim, o trabalho teve como objetivo avaliar as respostas fisiológicas e de crescimento em plantas de milho submetidas ao déficit hídrico e inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares (FMA).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cultura do milho (*Zea mays* L.)

O milho (*Zea mays* L.) pertencente à família das gramíneas (Poaceae) e é uma cultura cultivada mundialmente, sendo um dos cereais básicos responsáveis pela produção de diversos produtos industriais, fornecendo rações e alimentos para milhões de pessoas (Akram *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022). O milho foi domesticado no sul do México/Meso América há muitos anos, logo seu cultivo se tornou global e é uma cultura importante para vários países, especialmente da América Latina e países asiáticos (Erenstein *et al.*, 2022). Esta cultura traz impactos positivo na segurança alimentar e nos meios de subsistência em muitas partes do mundo (Zhang *et al.*, 2021).

Os maiores produtores do mundo são os Estados Unidos, China, Brasil. Os Estados Unidos lideram a produção mundial, com cerca de 360 milhões de toneladas. A China ocupa o segundo lugar, com uma produção estimada em 267 milhões de toneladas, enquanto o Brasil, com produção aproximada de 110 milhões de toneladas, ocupa o terceiro lugar no ranking mundial de produção de milho (FAO, 2021). Com base no levantamento até fevereiro de 2024, a produção de milho no Maranhão está estimada em 2.691 toneladas (CONAB, 2024).

A cultura do milho é a segunda mais cultivada em termos de produção de grãos secos, e ocupa cerca de 197 milhões de hectares de terra em todo o mundo (Erenstein *et al.*, 2022). No entanto, os efeitos das mudanças climáticas têm reduzido a área plantada, pois a seca prolongada afeta as fases mais importantes do milho, como a floração e o enchimento dos grãos, o que reduz a produtividade (Mendis *et al.*, 2022; García *et al.*, 2023).

Durante o seu desenvolvimento, o milho necessita de uma grande quantidade de água, chegando a utilizar cerca de 600 mm de água por safra ao longo de seu ciclo. Durante o período de floração, se a cultura for exposta a mais de quatro dias de estresse hídrico, mais de 50% do rendimento pode ser perdido (Magalhães *et al.*, 2002; Magalhães; Durães, 2006).

Apresenta metabolismo C4, o que lhe confere alta eficiência na fixação de dióxido de carbono (CO₂) durante o processo fotossintético e maior tolerância a altas temperaturas. No entanto, temperaturas elevadas podem afetar negativamente o processo metabólico e fisiológico da planta de milho, refletindo diretamente em seu crescimento e produtividade (Yousaf *et al.*, 2022). O déficit hídrico pode afetar diversas fases do crescimento do milho, desde a germinação e crescimento inicial até a floração e enchimento de grãos, resultando em redução da fotossíntese, menor condutância estomática e alterações no equilíbrio hormonal da planta

(Mendis *et al.*, 2022; García *et al.*, 2023). Durante o ciclo de vida do milho, a planta apresenta diferentes níveis de tolerância ao déficit hídrico de acordo com o estágio fenológico, que inclui a germinação, o estágio vegetativo (V) e o estágio reprodutivo (R) (Magalhães; Durães, 2006).

Na germinação, a semente absorve água e começa a crescer, produzindo a radícula (que irá se desenvolver em uma raiz primária), coleótilo e plúmula. A plântula, então, emerge da superfície do solo e começa a desenvolver o primeiro cotilédono, ou seja, a primeira folha que fornece a energia para o crescimento inicial da planta (Magalhães; Durães, 2006). A fase vegetativa inicia-se na emergência (VE) e termina no pendoamento (VT), sendo subclassificada entre VE e VT de V1, V2, V3 a Vn; onde (n) indica a última folha emitida antes do pendoamento (Vargas; Peixoto; Roman, 2006; Magalhães *et al.*, 2002).

É durante o estágio vegetativo que as plantas de milho produzem novas folhas e aumentam em altura (Santos *et al.*, 2022). Com isso, uma boa atividade fotossintética é necessária para manutenção do crescimento dessas plantas; que sob condições de luz intensa e temperaturas moderadas podem melhorar o potencial da fotossíntese nesse período (Wang *et al.*, 2018).

O estágio reprodutivo é o período em que a planta de milho desenvolve a espiga contendo os grãos, sendo necessário suprimento adequado de água e nutrientes para desenvolver espigas saudáveis e produzir grãos de boa qualidade (Magalhães; Durães, 2006). A polinização é um processo importante nessa fase, pois cada grão de milho precisa ser polinizado individualmente para se desenvolver satisfatoriamente. A fase estacionária é o estágio final do ciclo de vida da planta de milho, é nela que ocorre o amadurecimento e os grãos atingem seu tamanho máximo. As plantas começam a secar, as folhas começam a morrer e os grãos ficam mais duros e secos (Santos *et al.*, 2022).

Diferentes estádios de desenvolvimento da cultura do milho requerem micro e macronutrientes que garantem o funcionamento, crescimento e desenvolvimento ideais da planta. Macronutrientes como potássio, fósforo ou cálcio garantem o bom funcionamento dos processos metabólicos da planta (Sitko *et al.*, 2019). Ainda de acordo com Stiko *et al.* (2019) os processos fotossintéticos na planta dependem diretamente do fornecimento desses macronutrientes.

Portanto, estudar as características de desenvolvimento e a fisiologia da cultura do milho é importante para fornecer informações valiosas sobre o funcionamento da planta. Compreender como a planta cresce, se desenvolve e interage com o ambiente é essencial para o

desenvolvimento de práticas agrícolas mais eficientes e ecológicas, bem como para melhorar a produção e a qualidade dos grãos de milho (Magalhães *et al.*, 2002).

2.2 Déficit hídrico em plantas de milho

As plantas são organismos vivos que dependem da água para a sua sobrevivência e desenvolvimento (El-Fattah *et al.*, 2023). No entanto, muitas vezes, as plantas enfrentam situações de seca, em que não há água suficiente disponível no solo para atender às suas necessidades, ocasionando a diminuição da taxa de crescimento, a redução do tamanho e número de folhas, a queda prematura das folhas e a diminuição da produção de frutos e sementes. O déficit hídrico é um dos principais fatores que limitam o crescimento e a produtividade das plantas em muitas regiões do mundo, podendo ter consequências para a segurança alimentar e a economia global (Irfan *et al.*, 2023).

A escassez de água pode ser causada por vários fatores, incluindo falta de precipitação, seca do solo, salinidade, altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar. Quando as plantas são expostas a essas condições, elas podem sofrer uma série de reações regulatórias e bioquímicas para minimizar os efeitos adversos e manter a sobrevivência e o crescimento (Xu; Lu; Tong, 2018; Sherin; Aswathi; Puthur, 2022; Fresno; Solé-Corbatón; Munné-Bosch, 2023).

O déficit hídrico causa alterações nos mecanismos do metabolismo da planta (*e.g.* fotossíntese, transpiração, condutância estomática, translocação de fotoassimilados), o que reflete diretamente no desenvolvimento e na produtividade (Liu *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2020; Verma *et al.*, 2021). As plantas frequentemente fecham seus estômatos para reduzir a perda de água por transpiração, porém há redução da fotossíntese e conseqüentemente interfere no desenvolvimento da planta. Esse fechamento estomático é mediado por sinais hormonais, como o ácido abscísico (ABA), que aumenta durante o déficit hídrico (Ren *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2020).

Os efeitos do déficit hídrico em plantas de milho variam dependendo da severidade e duração do estresse. Podendo afetar diferentes estádios de crescimento, desde a germinação e crescimento inicial até a floração e enchimento de grãos, e pode levar à redução da fotossíntese, menor condutância estomática e alterações no equilíbrio hormonal da planta. Como resultado, as respostas fisiológicas e bioquímicas do milho ao déficit hídrico são complexas e envolvem uma série de mecanismos que permitem que a planta sobreviva e se adapte ao estresse (Ren *et al.*, 2019).

Anjum *et al.* (2017) constataram que o déficit hídrico no milho inibiu o crescimento e a produção. Além disso, o déficit hídrico pode levar a mudanças na acumulação de osmólitos e no sistema de defesa antioxidante, ocasionando aumento das espécies reativas de oxigênio (EROs) o que pode danificar agressivamente as membranas biológicas e moléculas orgânicas.

Tem havido um crescente interesse em entender os fatores envolvidos na resposta das plantas ao déficit hídrico, bem como em desenvolver estratégias para melhorar a tolerância das plantas à seca (Sherin; Aswathi; Puthur, 2022). É importante estudar as respostas de diferentes híbridos de milho ao déficit hídrico para desenvolver estratégias de melhoramento de plantas mais eficazes para lidar com o déficit hídrico (Anjum *et al.*, 2017). Isso inclui o desenvolvimento de variedades de plantas mais resistentes à seca por meio de técnicas de melhoramento genético, bem como a utilização de práticas agronômicas que melhoram o uso da água, como a irrigação por gotejamento, o uso de microrganismo e adição de compostos orgânicos ao solo para aumentar sua capacidade de retenção de água (Costa *et al.*, 2020; Sales *et al.*, 2021).

2.3 Uso de FMA na mitigação do déficit hídrico em plantas

Os fungos micorrízicos são um grupo de fungos simbioses que vivem em associação mutualística com as raízes de plantas terrestres. Eles pertencem ao filo Glomeromycota, que é um dos grupos mais primitivos de fungos (Oehl *et al.*, 2011; Goto; Jobim, 2023).

Os fungos micorrízicos são classificados em ectomicorrizas e endomicorrizas. As ectomicorrizas são predominantemente formadas por fungos basidiomicetos, desempenhando um papel econômico significativo para as espécies arbóreas. Essas micorrizas desenvolvem-se nos espaços intercelulares das raízes das plantas, onde as células radiculares ficam envolvidas por uma rede de hifas, formando o que é conhecido como micélio. Importante notar que as hifas não adentram as células das raízes (Folli-Pereira *et al.*, 2012).

Por outro lado, nas endomicorrizas, as hifas do fungo penetram nas células das raízes das plantas, formando estruturas denominadas de arbúsculos, que permitem a troca de nutrientes entre o fungo e a planta. Em troca, os FMA recebem carboidratos produzidos pela planta através da fotossíntese (Folli-Pereira *et al.*, 2012; Gomes Júnior *et al.*, 2018; Kobae, 2019).

A simbiose entre os FMA e as plantas é considerada uma das mais importantes associações ecológicas do planeta, pois os FMA são capazes de aumentar significativamente a absorção de nutrientes pelas plantas, especialmente de fósforo, que é um elemento essencial

para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Gomes Júnior *et al.*, 2018; Kobae, 2019). Além de fornecer nutrientes, a associação com os fungos micorrízicos arbusculares pode melhorar a resistência das plantas aos estresses ambientais, como seca, salinidade e altas temperaturas (Folli-Pereira *et al.*, 2012; Xu; Lu; Tong, 2018; Pauwels; Graefe; Bitterlich, 2023), os fungos também podem proteger as plantas contra patógenos do solo e melhorar a qualidade do solo (Chen *et al.*, 2014).

Os FMA são encontrados em uma ampla variedade de habitats terrestres, incluindo florestas, pastagens, áreas agrícolas e até mesmo em solos desérticos. Eles desempenham um papel crucial na reciclagem de nutrientes e na manutenção da biodiversidade nos ecossistemas terrestres e ainda podem ser usados como agentes biofertilizantes para melhorar o crescimento das plantas e produtividade agrícola (Srivastava; Johny; Adholeya, 2021).

Esses microrganismos podem desempenhar um papel importante na indução de controle de resistência ao déficit hídrico em plantas. Quando as plantas enfrentam condições de seca, os FMA podem ajudar a melhorar a eficiência do uso de água, o que reduz o impacto negativo do déficit hídrico (Selvakumar *et al.*, 2016; Costa *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2020).

Existem várias maneiras pelas quais os FMA podem atuar como atenuantes de déficit hídrico em plantas. Uma delas é através do aumento da superfície radicular das plantas. Os FMA formam uma simbiose arbuscular com as raízes das plantas, o que aumenta a superfície radicular disponível para absorção de água e nutrientes, o que pode melhorar a fotossíntese e, conseqüentemente, reduzir a perda de água pela transpiração. Isso pode ser particularmente importante em solos com baixa disponibilidade de água. Eles também produzem glomalina, um polímero proteico que é produzido e depositado no solo. A presença de glomalina no solo pode aumentar a capacidade do solo de reter água, o que pode ajudar as plantas a sobreviverem durante períodos de seca (Folli-Pereira *et al.*, 2012; Sousa, *et al.*, 2012).

Os FMA também podem induzir a produção de compostos antioxidantes (polifenóis, carotenoides e enzimas antioxidantes) nas plantas, o que ajuda a protegê-las dos danos oxidativos causados pelo estresse hídrico. Além disso, os FMA podem ajudar a melhorar a absorção de nutrientes pelas plantas de milho, o que é importante durante períodos de seca, quando a disponibilidade de nutrientes no solo pode ser limitada (Ren *et al.*, 2019).

Estudos demonstraram que a inoculação de plantas com FMA pode melhorar a tolerância das plantas ao déficit hídrico, a inoculação com o fungo micorrízico *Funneliformis mosseae* resultou em melhorias no status ionômico e bioquímico das plantas de milho, além de mitigar os efeitos negativos do déficit hídrico (Bahraminia *et al.*, 2020). As plantas de milho

inoculadas com FMAs apresentaram um melhor desempenho em relação às não inoculadas, tanto no crescimento vegetativo quanto na produtividade, eficiência do uso da água (EUA), produção de biomassa em condições de seca (El-Fattah *et al.*, 2023).

Na cultura do milho, por ser uma das principais *commodities* agrícolas, há a necessidade de se utilizar constantemente inovações em seu sistema de produção (Fernandes *et al.*, 2023). Portanto, a inoculação com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) pode mitigar o impacto adverso da escassez de água durante estádios fenológicos críticos, como floração, enchimento de grãos e na produtividade do milho. O desenvolvimento de produtos biológicos a partir desse microrganismo pode chegar aos agricultores mais rápido do que cultivares resistentes ou tolerantes obtidos por meio do melhoramento de plantas, ponto que adquire particular importância diante das crescentes demandas por alimentos e das mudanças climáticas (Vargas; Peixoto; Roman, 2006; El-Fattah *et al.*, 2023).

Logo, a inoculação de plantas com FMA pode ser uma estratégia promissora para diminuir o impacto do déficit hídrico nas plantas, e aumentar a eficiência do uso de água melhorando a tolerância ao déficit hídrico (Porcel *et al.*, 2015). Portanto, é importante realizar mais pesquisas para entender melhor a associação entre FMA e plantas para mitigação do déficit hídrico.

2.4 Parâmetros Fisiológicos

A análise da fluorescência da clorofila *a* constitui uma avaliação da eficiência fotoquímica das plantas, possibilitando a obtenção de informações cruciais acerca do desempenho e dos mecanismos fisiológicos detectados durante situações de estresse biótico e abiótico nas plantas (Bucher; Bernhardt-Römermann; Römermann, 2018). Fatores como excessos de luminosidade e déficit hídrico podem afetar a fluorescência da clorofila *a*. Janeeshma *et al.* (2022) inferiram que a intensidade e as variações espectrais da luz afetam a fluorescência da clorofila *a*. Dessa forma, a fluorescência da clorofila *a* é influenciada pela intensidade da luz. Em baixa intensidade luminosa, a fluorescência é mais pronunciada, enquanto em alta intensidade luminosa, pode ser reduzida devido à dissipação de energia ou à fotoinibição. (Murchie; Lawson, 2013).

A eficiência quântica máxima do fotossistema II (F_v/F_m) representa a relação entre a fluorescência variável (F_v) e a fluorescência máxima (F_m) da clorofila *a*, e é considerado um indicador da eficiência fotoquímica e da saúde das plantas, dessa forma, a diminuição na relação

Fv/Fm pode indicar estresse oxidativo ou danos à membrana fotossintética (Singh; Kumar; Soni, 2022). Chen *et al.* (2016) constataram que o déficit hídrico reduz consistentemente e significativamente a relação Fv/Fm, porém esse efeito varia em sua gravidade entre as diferentes linhagens de milho.

A relação Fv/F0 é mencionada no contexto da análise de fluorescência da clorofila como um parâmetro importante para avaliar a atividade do fotossistema II. Essa relação representa a eficiência máxima do fotossistema II na conversão de energia luminosa em energia química durante a fotossíntese e é usada para avaliar a capacidade das plantas de realizar a fotossíntese sob diferentes condições ambientais. Já a relação PI_{ABS} é uma medida derivada da análise de fluorescência da clorofila que fornece informações sobre a eficiência do fotossistema II em condições de luz ambiente. Ambas as relações são usadas para avaliar a eficiência fotoquímica das plantas; enquanto valores mais altos indicam uma maior eficiência do FSII, valores mais baixos podem indicar estresse ou danos nas plantas (Murchie; Lawson, 2013).

Estudos relatam que o Fv/Fm com valores entre 0,75 e 0,85 em plantas indicam um aparato fotossintético intacto, enquanto valores abaixo de 0,75 sinalizam estresse e uma redução no potencial fotossintético da planta (Bolhar-Nordenkampf *et al.*, 1989; Murchie; Lawson, 2013; Guidi; Lo Piccolo; Landi, 2019). Enquanto valores de PI acima de 1,0 indicam uma alta eficiência do aparato fotossintético (Strasser; Srivastava; Tsimilli-Michael., 2000).

Em resumo, a análise da fluorescência da clorofila *a* é uma ferramenta importante para avaliar a eficiência fotoquímica das plantas e detectar mecanismos fisiológicos durante situações de estresse biótico e abiótico. A relação Fv/Fm é um indicador da eficiência fotoquímica e da saúde das plantas, (Murchie; Lawson, 2013).

O índice de intensidade de verde, amplamente utilizado em estudos de fisiologia vegetal, é uma medida não destrutiva da clorofila em folhas, que pode ser utilizada como um indicador da saúde e do estado nutricional das plantas (Piotto *et al.*, 2018), sendo também empregado para monitorar a nutrição de nitrogênio das plantas, o que é importante para o seu crescimento e produtividade geral (Avramova *et al.*, 2016). A relação entre o índice de intensidade de verde e a fluorescência da clorofila *a* pode fornecer percepções valiosas sobre o estado das plantas e sua capacidade de realizar a fotossíntese de forma eficiente (Bucher; Bernhardt-Römermann; Römermann, 2018).

Foi observado em um estudo com plantas de milho sob condições de déficit hídrico um aumento significativo no conteúdo de clorofila em comparação com as plantas não inoculadas. Isso sugere que a inoculação com fungos micorrízicos arbusculares pode melhorar a eficiência



fotossintética das plantas de milho sob estresse hídrico, como indicado pelo aumento no índice de intensidade de verde (Ahraminia *et al.*, 2020).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Avaliar as respostas fisiológicas e de crescimento em plantas de milho submetidas ao déficit hídrico e inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares (FMA).

3.2 Objetivos Específicos

- Comparar o desempenho das plantas de milho inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) em relação às plantas não inoculadas sob condições de déficit hídrico;
- Analisar a eficiência fotossintética das plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico inoculadas com FMA;
- Avaliar os efeitos da inoculação com FMA na tolerância ao estresse hídrico e na atividade fotossintética das plantas de milho;
- Investigar a capacidade dos fungos micorrízicos arbusculares em mitigar os efeitos negativos do déficit hídrico nas plantas de milho.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo e material vegetal

O experimento foi conduzido no período de setembro a novembro de 2023, em casa de vegetação, no Programa de Pós-graduação em Agroecologia da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, Cidade Universitária Paulo VI, localizada no município de São Luís/MA (2° 31' 51" S e 44° 18' 24" W). O clima predominante na região é o tropical com estação seca (Aw) (Köpen-Geiger, 2015).

Foram utilizadas sementes do milho híbrido AG1051 (Semini[®]) de ciclo precoce. O solo utilizado foi coletado em uma área com vegetação preservada na Fazenda Escola da Universidade Estadual do Maranhão. A partir das análises das características físicas e químicas do solo, na camada de 0-20 cm de profundidade, obteve-se os seguintes resultados: pH em CaCl₂ = 4,0; H+Al=41 cmol_c dm⁻³; 0 cmol_c dm⁻³ de Al⁺³; 1,0 cmol_c dm⁻³ de Ca⁺²; 4,0 cmol_c dm⁻³ de Mg⁺²; 4,6 cmol_c dm⁻³ de K⁺; 5,0 mg dm⁻³ de P (Mehlich); 11,0 g dm⁻³ de matéria orgânica; e saturação por bases de 19%; argila=120 g kg⁻¹; silte=30 g kg⁻¹ e areia=850 g kg⁻¹; e sendo classificado como Solo franco-arenoso com textura arenosa.

Para fertilização do solo foi realizada a adubação recomendada em vasos para ambientes controlado conforme a metodologia de Novais *et al.* (1991); aplicando-se 100 mg N, 300 mg P e 150 mg K kg⁻¹ de solo, no sulco de plantio e próximo às sementes.

4.2 Inoculação de Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA)

Uma amostra do solo foi encaminhada para o Laboratório de Microbiologia do Solo (UEMA/São Luís) para extração dos esporos (Jenkins, 1962; Gerdeman; Nicholson, 1963), quantificação e identificação das espécies de FMAs nativos, utilizando os caracteres morfológicos como base para a taxonomia.

Para a inoculação do solo nos tratamentos de FMA foi utilizada a espécie identificada *Rhizoglyphus clarum* (CNPAB-A05), adquirida do banco de germoplasma da Embrapa Agrobiologia (Seropédica, RJ). Uma dose equivalente a 1,43 g contendo em média de 100 esporos foi aplicada ao lado das sementes, no momento do plantio, para garantir o sucesso da infecção micorrízica.

4.3 Design experimental

O delineamento foi em blocos casualizados (DBC), com esquema fatorial 4 (solo estéril; natural; estéril + *Rhizoglyphus clarum*; natural + *R. clarum*) x 2 (irrigado e déficit hídrico), e quatro repetições, totalizando 32 parcelas experimentais (Quadro 1).

Quadro 1 - Códigos e descrição dos tratamentos do experimento com milho e inoculação de FMA, em São Luís/MA.

Código	Descrição do tratamento
IR_EST	Irigado com solo esterilizado
DH_EST	Sob déficit hídrico com solo esterilizado
IR_NAT	Irigado com solo natural
DH_NAT	Sob déficit hídrico com solo natural
IR_EST + RIZHO	Irigado com solo esterilizado e inoculado com <i>R. clarum</i>
DH_EST + RIZHO	Sob déficit hídrico com solo esterilizado e inoculado com <i>R. clarum</i>
IR_NAT+RIZHO	Irigado com solo natural e inoculado com <i>R. clarum</i>
DH_NAT+RIZHO	Sob déficit hídrico com solo natural e inoculado com <i>R. clarum</i>

Cada parcela foi representada por um vaso com capacidade de 20 L e uma planta por vaso (figura 1). O solo foi seco e peneirado, e para o tratamento estéril o solo foi autoclavado a uma temperatura de 120°C e pressão de 1,5 atm, por duas horas. A semeadura foi realizada com cinco sementes por vaso, com desbaste realizado no décimo dia, deixando apenas uma planta por vaso. O ensaio foi conduzido entre a fase V5-V6, o equivalente a 51 dias após o plantio (DAP).



Figura 1- Experimento instalado em casa de vegetação em São Luís/MA.

Durante o experimento as variáveis meteorológicas, temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa (%) e radiação fotossinteticamente ativa ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foram coletadas usando uma mini estação WatchDog (modelo 1000 Series, Spectrum Technologies, Inc., Illinois, USA), e armazenados ao longo do dia com intervalos de 15 min (Figura 2). A partir dos dados de temperatura e umidade relativa, o DPV_{ar} foi calculado conforme equação (Eq. 1) proposta por Jones (1992):

$$\text{DPV}_{\text{ar}} = 0,61137 * \exp((17,502 * T) / (240,97 + T)) * (1 - (\text{UR} / 100)) \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que: DPV: déficit de pressão de vapor; exp: exponencial; T: temperatura em graus Celsius; e UR: umidade relativa em %.

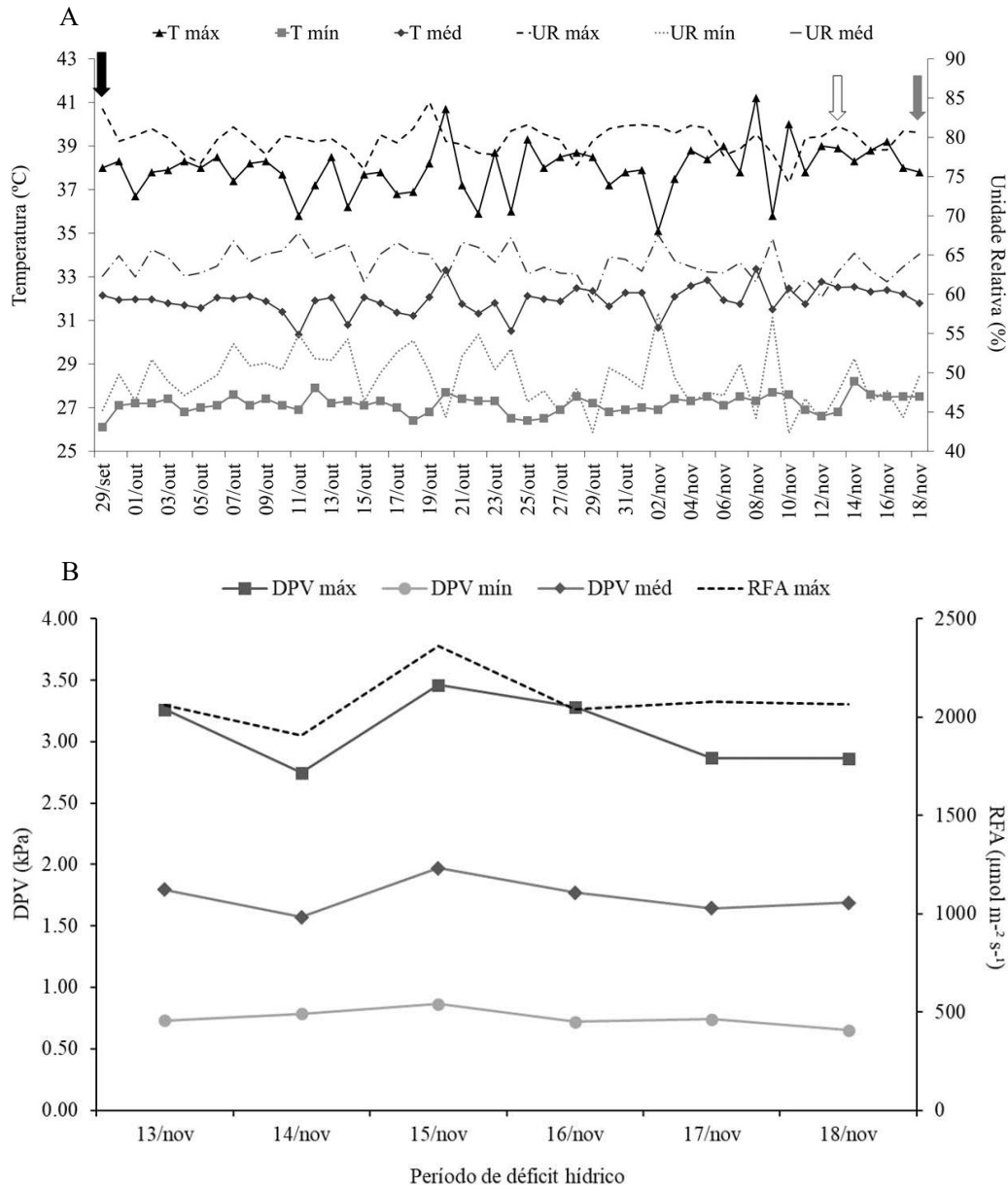


Figura 2 – Dados climáticos coletados durante o período experimental, setembro/2023 a novembro/2023. **A**- Temperatura máxima (T máx), média (T méd) e mínima (T mín); e Umidade relativa máxima (UR máx), média (UR méd) e mínima (UR mín). **B**- Déficit de pressão de vapor máxima (DPV máx), média (DPV méd) e mínima (DPV mín) e Radiação fotossinteticamente ativa máxima (RFA máx). A seta preta indica a data do plantio; as setas branca e cinza indicam o início e final do período do déficit hídrico, respectivamente.

A manutenção da umidade do solo foi realizada por meio de irrigação diária, sendo mantida a 90% da capacidade de campo (CC) até os 46 DAP. A restrição hídrica ocorreu aos 46 DAP, entre a fases V5 e V6 (período em que fatores ambientais podem afetar as plantas comprometendo o potencial do número fileiras por espiga).

O controle do manejo da irrigação foi realizado com base na umidade do solo, sendo a mesma monitorada com um sensor de umidade modelo RS485 TH-HMI043, ComWinTop, Mainland, China. Cinco vasos foram preenchidos com solo seco ao ar livre obtendo-se o peso

seco (PS) e leitura do peso seco (Lps) (Morales *et al*, 2015). Em seguida, os mesmos foram saturados e, após o término da percolação foram pesados, obtendo-se o peso úmido (PU) e leitura de umidade de (Lpu). A diferença entre PS e PU foi atribuída à capacidade de armazenamento de água no vaso (Cav). Considerou-se que 1,0 g equivale a 1 mL da capacidade de armazenamento de água nos vasos. As leituras com sensor de umidade foram feitas diariamente em cada tratamento.

4.4 Variáveis analisadas

4.4.1 Análises de crescimento e biomassa

A altura das plantas (AP) foi medida em cm, da superfície do solo até o ápice da planta, com auxílio de trena; e o diâmetro do colmo foi realizado com paquímetro digital (Paquímetro digital em Aço, 150 mm, Stainless). Foram avaliados aos 25, 32, 36, 40, 46, 48, 50 e 51 dias após o plantio. Ao final do experimento as plantas foram coletadas e separadas nas diferentes partes vegetativas, sendo avaliada a massa fresca de folhas (MFF) e colmo (MFC), e massa seca de folhas (MSF), colmo (MSC) e raízes (MSR), determinadas com o auxílio de balança, após a secagem do material em estufa de circulação forçada de ar a 70°C até peso constante.

4.4.2 Área foliar

A área foliar (AF, cm²) foi determinada de acordo com o método descrito por Radford (1967). Utilizando a fórmula ($AF = K (CF * LF)$). Onde: AF= área foliar (cm²); K = Constante (0,75); CF = comprimento da folha (cm) e LF = largura máxima da folha (cm).

4.4.3 Massa foliar específica (MFE)

Para determinar a MFE (kg m⁻²), na mesma folha utilizada para o CRA, foram coletados 10 discos foliares de área conhecida, posteriormente foram colocados em estufa de circulação forçada de ar a 70°C até atingirem massa constante. A MFE foi obtida pela relação entre a massa dos discos secos e a área dos discos foliares.

4.4.4 Conteúdo relativo de água (CRA)

O conteúdo relativo de água (CRA) foi avaliado aos 51 dias após o plantio (DAP), extraíndo-se dez discos da folha totalmente expandida completamente formadas (apresentando colar, lígula e aurícula visíveis), coletada entre 09:00 e 10:00 h. Os discos foram imediatamente pesados em balança analítica para determinar a massa do tecido fresco (MF). Em seguida o material foi reidratado com água deionizada e mantido em repouso por um período de 24 h em ausência de luz. Após o tempo decorrido, os discos foram secos em papel toalha e posteriormente pesados, para quantificar a massa túrgida (MT). Para determinar o valor da massa seca, os discos foram transferidos para sacos de papel e colocados em estufa a 65°C, com ventilação forçada de ar, por um período de 48 h. Em seguida, foram pesadas e o valor obtido denominado de massa seca (MS). O conteúdo relativo de água foi calculado conforme equação (eq. 2) de acordo com metodologia descrita por Deng *et al.* (2024).

$$\text{CRA} = (\text{MF} - \text{MS}) / (\text{MT} - \text{MS}) \times 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que: CRA (%): conteúdo relativo de água; MF: Massa Fresca (g); MS: Massa Seca (g); e MT: Massa Túrgida (g)

4.4.5 Água da Parte Aérea -APA (g H₂O)

A Água da parte aérea foi determinada pela diferença entre a Massa Fresca Total (Massa Fresca da Folha + Massa Fresca do Colmo) e Massa Seca Total (Massa Seca da Folha + Massa Seca do Colmo).

4.4.6 Teor de prolina

Para determinação do teor de prolina ($\mu\text{mol g}^{-1}$ MS), foram utilizadas 0,05 g de massa foliar seca, obtida dos mesmos folíolos que foram realizadas as demais análises fisiológicas. Para obtenção do extrato foi utilizado 2 mL de ácido sulfossalicílico 3%. A concentração de prolina foi determinada segundo metodologia descrita por Bates *et al.* (1973). Em tubos de ensaios foram colocadas alíquotas de 1 mL do extrato e adicionado 1 mL de reagente de ninhidrina ácida, mais 1 mL de ácido acético glacial (98%). Após homogeneização os tubos

foram hermeticamente fechados, agitados em vórtex e levados ao banho-maria por 1 hora a 100°C. Logo após, a reação foi interrompida imediatamente com banho de gelo. Em seguida, foram adicionados à solução 2 mL de tolueno (97%) e os tubos foram agitados em vórtex por 20 segundos. O cromóforo contendo tolueno foram aspirados da fase aquosa e realizado a leitura em espectrofotômetro a 520 nm, utilizando tolueno como padrão. A concentração de prolina (mg g^{-1} MS) foi determinada a partir de curva padrão de L-prolina.

4.4.7 Carboidratos solúveis totais

A determinação do conteúdo de carboidratos foi realizada pelo método de Dubois *et al.* (1956). Para preparar o extrato foi pesado 0,020 g de massa seca (MS) da folha, que foi colocado em almofariz juntamente com 2 mL de água destilada para serem macerados, posteriormente foi colocado mais 2 mL de água destilada para lavar o almofariz e transferir para tubos de ensaio de 15 mL (totalizando 4 mL de extrato). Em seguida a mistura foi agitada por 30 segundos duas vezes dentro do período de 1 hora. Posteriormente os extratos foram transferidos para microtubos (2 microtubos com 2 mL cada) e levados à centrifugação a 3.000 rpm por 15 min em temperatura (T) ambiente. Em seguida foi coletado 2 mL do sobrenadante (1 mL de cada microtubo) para um novo microtubo de 2 mL. O sobrenadante foi centrifugado novamente a 6.000 rpm por 10 min a T ambiente. Logo depois foi coletado (aprox. 1 mL) que foi utilizado para quantificação de carboidratos solúveis totais. Para mensuração foi aplicado 0,50 mL do extrato em tubos de ensaio e adicionado 500 μL de fenol 5% (agitado por 20 segundos) e 2,5 mL de ácido sulfúrico concentrado. Logo depois o material ficou em repouso em bandeja de água por 10 minutos, e depois então os tubos foram agitados por 20 segundos. A determinação dos CST foi realizada em espectrofotômetro a 490 nm e a concentração (mg g^{-1} MS) calculada a partir de curva padrão.

4.4.8 Índice de Intensidade de verde

A intensidade de verde foi realizada com o auxílio de um Medidor Portátil de Clorofila (MPC), modelo SPAD-502 “Soil Plant Analyser Development” (Minolta, Japão). As medições foram realizadas no período da manhã (8:00 às 10:00 h) e tarde (12:00 às 14:00 h), durante os cinco dias de déficit hídrico utilizando uma folha totalmente formada (apresentando colar, lígula e aurícula visíveis), realizando-se dez leituras por folha e obtendo-se a média por planta.

4.4.9 Fluorescência da clorofila *a*

As medições da fluorescência da clorofila *a* foram realizadas nas mesmas folhas utilizadas para as medições do índice de intensidade de verde durante os cinco dias do período de déficit hídrico. Utilizando uma folha totalmente expandida completamente formada (apresentando colar, lígula e aurícula visíveis), apresentando um bom estado fitossanitário, utilizando-se um fluorômetro portátil (FluorPen FP 110, Photon Systems Instruments, Drásov, República Tcheca). As leituras foram realizadas em dois períodos: manhã das 8:00 às 9:00 h, e tarde das 12:00 às 13:00 h. As folhas selecionadas foram adaptadas ao escuro durante um período de 30 minutos, utilizando-se cliques apropriados evitando-se a nervura central. Após a adaptação, as folhas foram expostas a um pulso saturante de luz ($3000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, comprimento de onda de 650 nm, por 1 segundo), obtendo-se as respostas relacionadas aos transientes da fluorescência da clorofila *a*, de acordo com equações do teste OJIP (Strasser *et al.*, 1995). Foram obtidos os valores referentes à fluorescência inicial (F_0), fluorescência variável (F_v), fluorescência máxima (F_m), fluorescência primária (F_v/F_0), eficiência quântica máxima do fotossistema II (F_v/F_m), e ao índice fotossintético (PI_{ABS}).

4.4.10 Os teores de pigmentos fotossintéticos

Os teores de clorofila *a*, *b* e os carotenoides foram quantificados utilizando-se cinco discos de $0,6 \text{ cm}^2$ de folhas frescas da parte mediana da planta. Eles foram picotados e acondicionados em tubos de vidro envolvidos com papel alumínio, contendo 5 mL de acetona 80%, acondicionados no escuro, à temperatura de 4°C , durante 72 horas. Em seguida realizou-se as leituras de absorvância dos extratos a 480, 645 e 663 nm de comprimento de onda, em espectrofotômetro, e calculados conforme Lichtenthaler (1987). Posteriormente foram calculados os teores de clorofila total ($a+b$).

4.5. Análises estatísticas

Todos os dados obtidos foram analisados a normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk, e submetidos à análise de variância (ANOVA), e as médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R versão



4.3.1 (R Core Team, 2023) com os pacotes “ExpDes.pt” (Ferreira *et al.*, 2018), e “factoextra” (Kassambara, 2020).

5 RESULTADOS

O solo natural contém vários microrganismos, incluindo fungos micorrízicos (Figura 3), então o solo foi esterilizado para minimizar o efeito dos microrganismos nativo para verificar o efeito da espécie de forma isolada.

Após extração dos esporos foram identificadas as espécies de fungos micorrízicos arbusculares no solo nativo utilizado para montagem do experimento com bases nos caracteres morfológicos para a taxonomia. As espécies identificadas foram *Acaulospora morrowiae*, *Acaulospora scrobiculata*, *Acaulospora foveata*, *Ambispora apendicula*, *Glomus* sp1, *Glomus* sp2, *Glomus* sp3 (*glomerulatum*) e *Glomus* sp 4 (Figura 3).

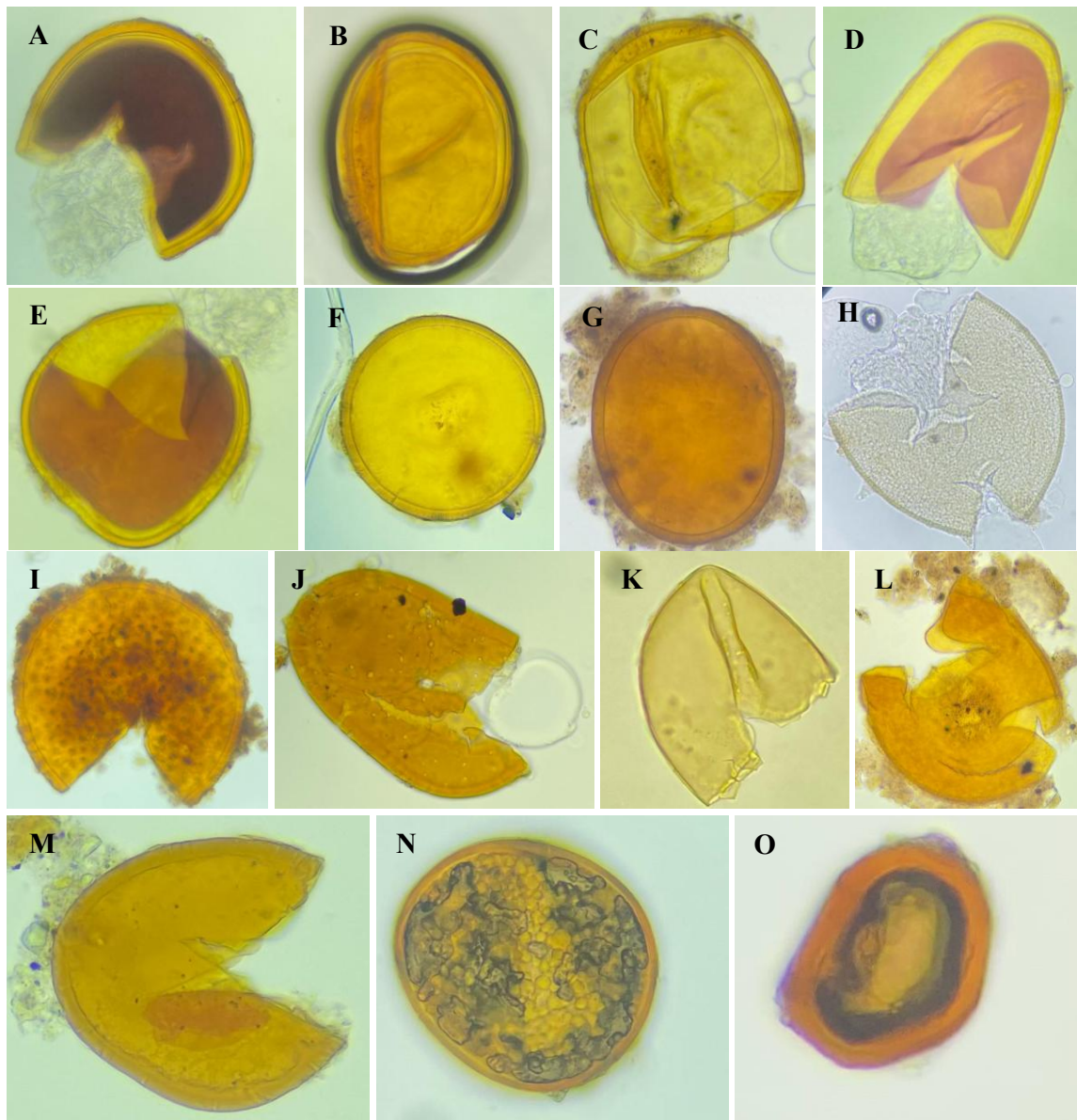


Figura 3 – Identificação de Espécies de Fungos Micorrízicos Arbusculares do solo nativo utilizado no experimento. *Acaulospora morrowiae* (A), *Glomus* sp1 (B), *Glomus* sp1 (C), *Acaulospora morrowiae* (D), *Acaulospora morrowiae* (E), *Glomus* sp1 (F), *Glomus* sp2 (G), *Acaulospora scrobiculata* (H), *Acaulospora foveata* (I), *Glomus* sp2 (J), *Glomus* sp 4 (K), *Ambispora apendicula* (L), *Glomus* sp2 (M), *Glomus* sp2 (N), *Glomus* sp3 (*glomerulatum*) (O).

Não foram encontradas diferenças estatísticas entre os tratamentos para a altura de planta de milho até os 50 dias após o plantio (DAP) ($P > 0,05$). No entanto, aos 51 DAP houve diferença ($P < 0,04$), com média de 51,7 cm planta⁻¹ para os tratamentos irrigados e 45,6 cm nos tratamentos sob déficit hídrico, representando uma redução de 11,8% para os tratamentos sob estresse hídrico. As médias dos tratamentos inoculados com *Rizhoglomus clarum* foram superiores tanto em condições de déficit hídrico quanto em condições irrigadas quando comparados com o tratamento de solo estéril (Figura 4).

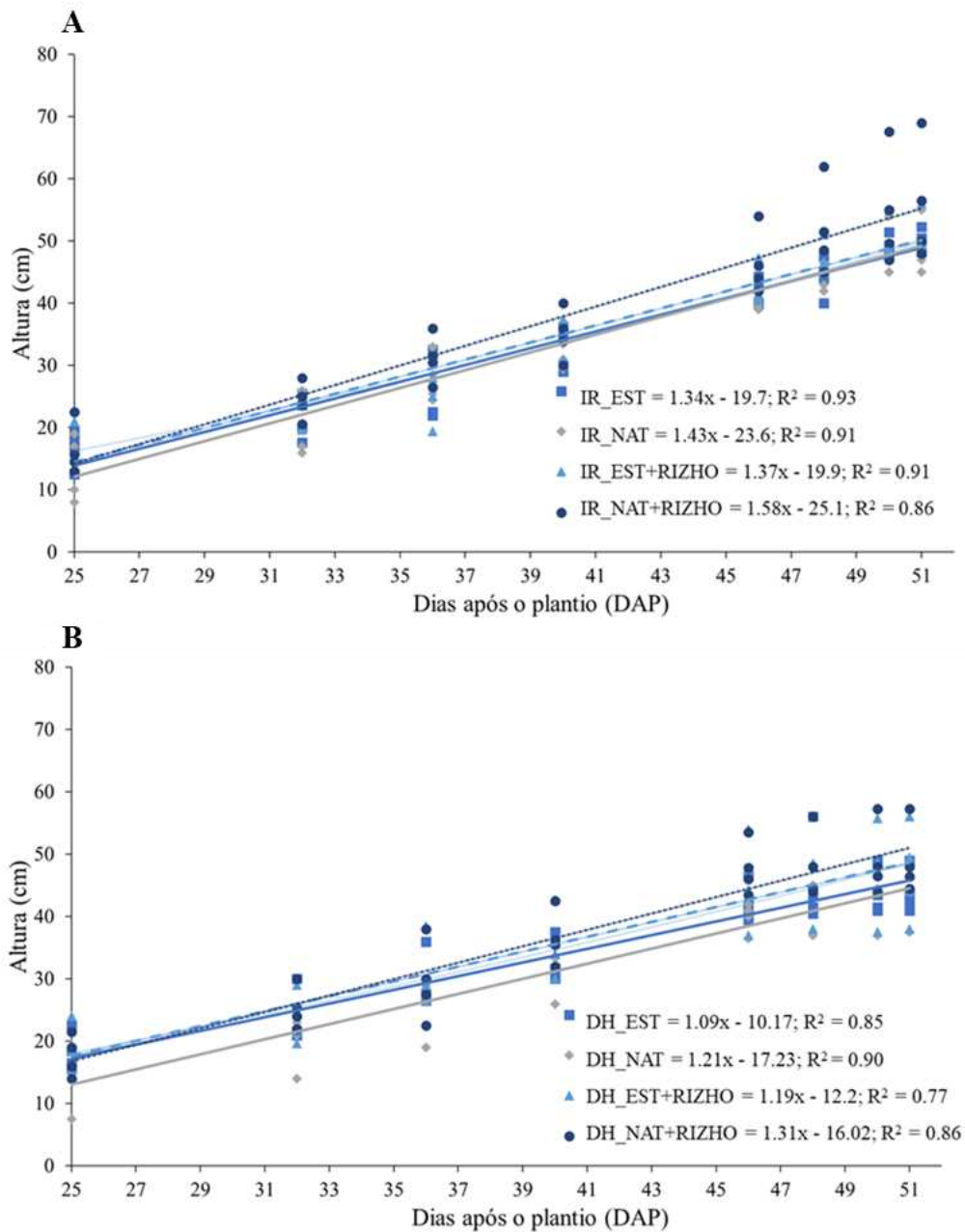


Figura 4 – Valores médios de altura de plantas de milho irrigadas (A) e sob déficit hídrico (B) com inoculação de FMA (n = 4). IR: irrigados; DH: déficit hídrico; NAT: solo natural; e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*.

O diâmetro do colmo apresentou diferença estatística aos 25, 40, 48, 50 e 51 DAP ($P < 0,02$). O tratamento com déficit hídrico e solo natural inoculado com *Rizhoglomus clarum* (DH_NAT+RIZHO) teve diâmetro do colmo 11,4 % maior, nestes dias, quando comparado a mesma condição com solo estéril (DH_EST) (Figura 5).

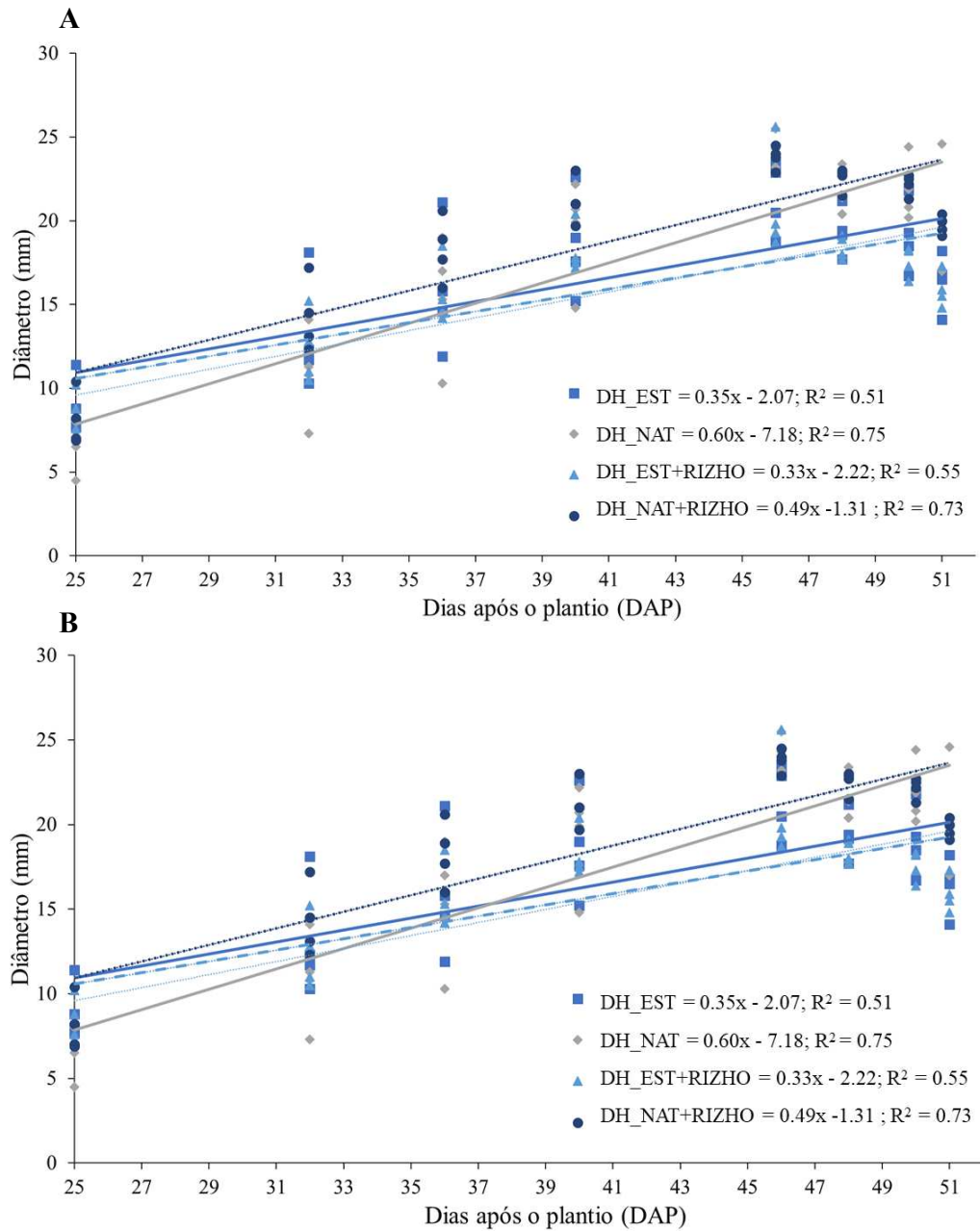


Figura 5 – Valores médios de diâmetro do colmo em plantas de milho irrigadas (A) e sob déficit hídrico (B) com inoculação de FMA (n = 4). IR: irrigados; DH: déficit hídrico; NAT: solo natural; e RIZHO: *Rizhologlomus clarum*.

A área foliar (AF) apresentou diferença estatística aos 46, 50 e 51 DAP ($P < 0,03$). Notavelmente, o DH_NAT+RIZHO apresentou uma área foliar média 21,4% e 30% maior nos dias 50 e 51, respectivamente, em comparação com o tratamento DH_EST. Da mesma forma, o tratamento irrigado com solo natural inoculado com *Rizhologlomus clarum* (IR_NAT+RIZHO) teve médias superiores nos dias 50 e 51 em comparação com o tratamento irrigado com solo estéril (IR_EST) (Figura 6).

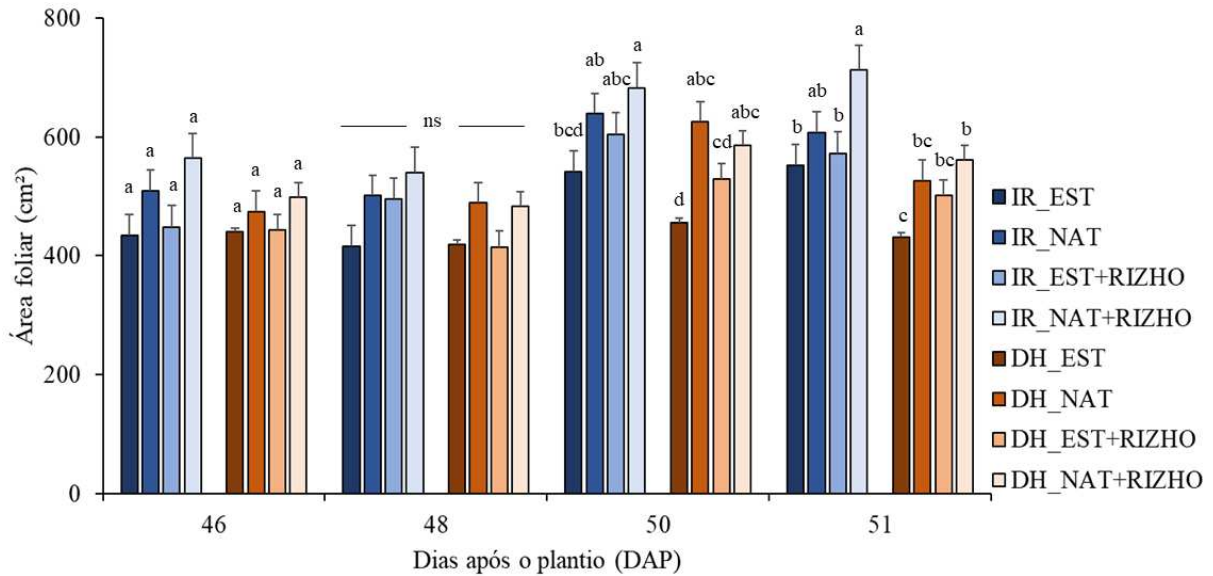


Figura 6 – Valores médios de área foliar em plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum* Médias seguidas pelas mesmas letras entre os tratamentos no dia de avaliação não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). ns: não significativo. Cada coluna representa a média \pm erro padrão (n = 4).

Houve diferença estatística na massa foliar específica (MFE) ($P < 0,000$) entre os tratamentos irrigados, com média de $0,019 \text{ kg m}^{-2}$ enquanto sob déficit hídrico, a MFE média foi de $0,016 \text{ kg m}^{-2}$. A inoculação com *R. clarum* em solo natural sob déficit hídrico (DH_NAT+RIZHO) promoveu uma resposta semelhante da MFE quando comparado ao tratamento não inoculado (IR_NAT) (Figura 7).

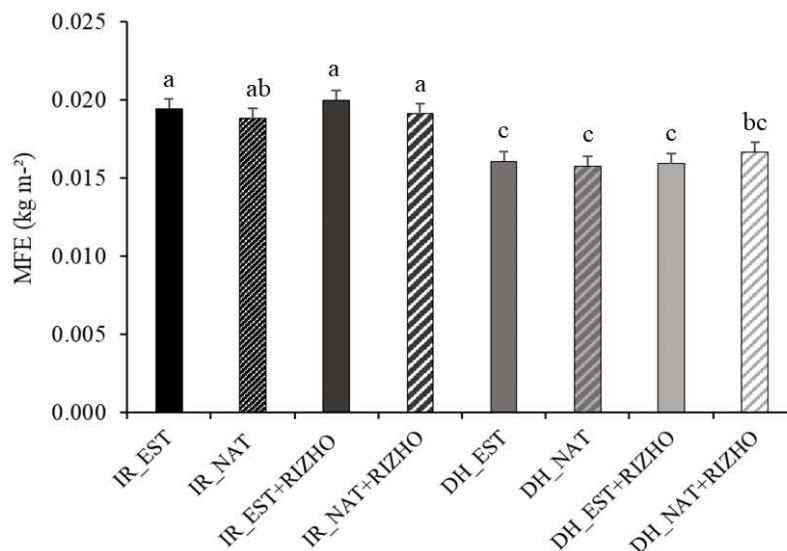


Figura 7 – Valores médios de Massa foliar específica (MFE) em plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). Cada coluna representa a média \pm erro padrão (n = 4).

Foi observada diferença estatística entre os tratamentos irrigados e sob déficit hídrico para massa fresca das folhas (MFF) e do colmo (MFC) ($P < 0,000$). O tratamento com solo natural (IR_NAT) e o IR_NAT+RIZHO apresentaram as maiores médias de MFF, 116,2 e 130 g planta⁻¹, respectivamente; e a MFC foi maior no tratamento IR_NAT+RIZHO. Os tratamentos sob estresse hídrico não apresentaram diferenças significativas entre si, com uma média geral de MFF de 65,9 g planta⁻¹ e MFC de 108,3 g planta⁻¹ (Figura 8A e B).

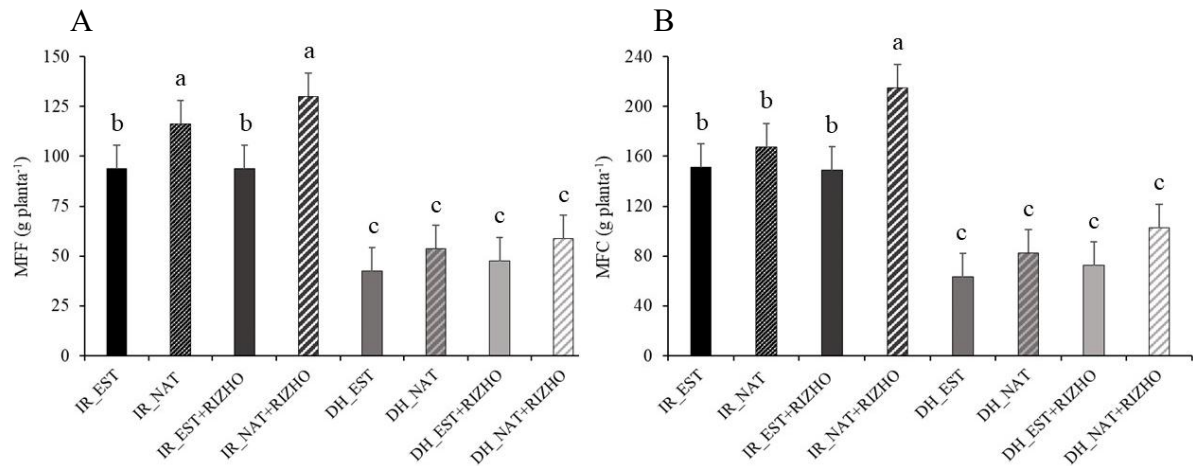


Figura 8 – Valores médios de massa fresca da folha (A) e colmo (B) em plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste Tukey (5%). Cada coluna representa a média \pm erro padrão (n = 4).

A massa seca das folhas (MSF), do colmo (MSC) e das raízes (MSR) apresentaram diferenças estatísticas entre os tratamentos ($P < 0,000$) (Figura 8). Para MSF o tratamento DH_NAT+RIZHO foi 45,4% maior em comparação ao tratamento DH_EST. O tratamento IR_NAT+RIZHO foi o maior entre os bem irrigados, e foi 43,7% maior quando comparado ao tratamento IR_EST (Figura 9A). A MSC no tratamento DH_NAT+RIZHO foi 100% maior quando comparado com o tratamento DH_EST, para a mesma comparação entre os tratamentos bem irrigados, o aumento foi 63,16% (Figura 9B). A MSR teve diferença significativa, e o tratamento IR_NAT+RIZHO foi 71,4% maior quando comparado ao tratamento IR_EST (Figura 9C).

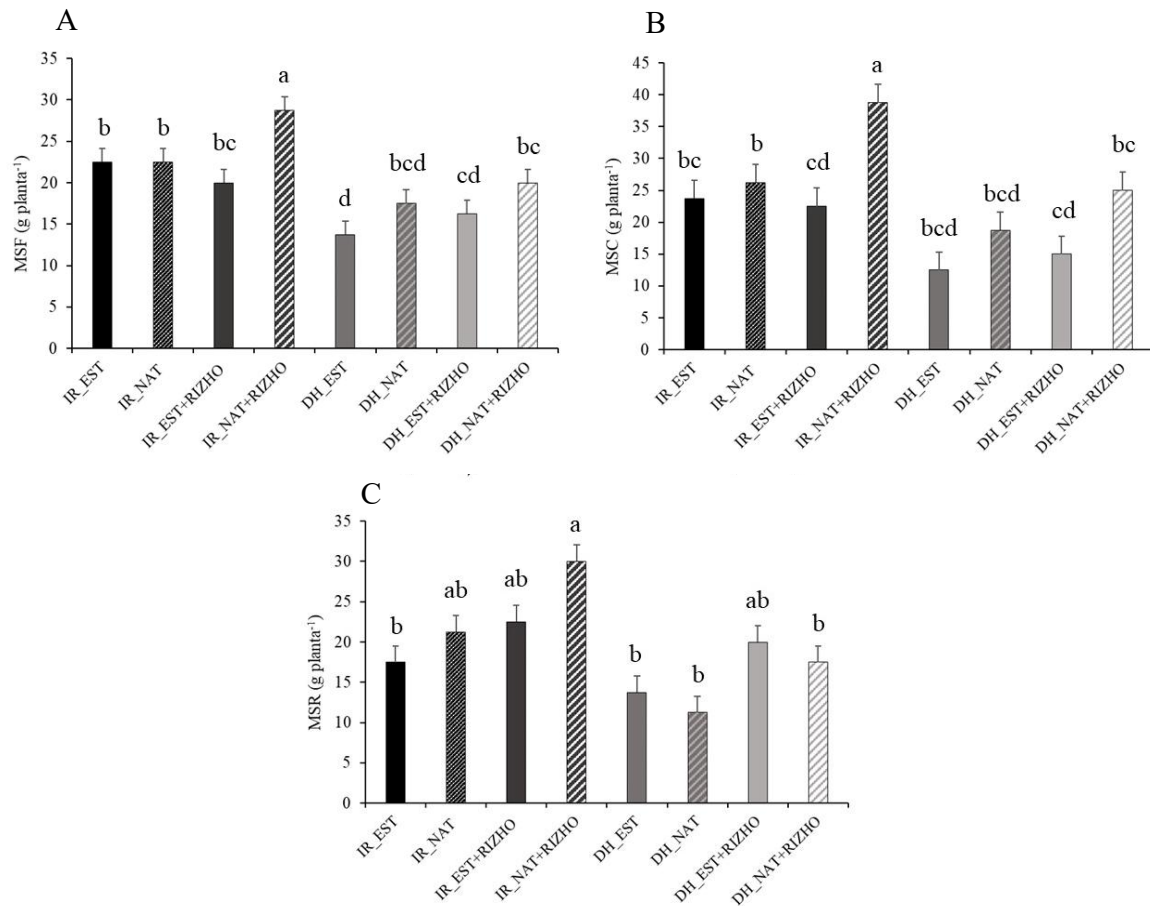


Figura 9 - Massa seca da folha (A), colmo (B) e raiz (C) em plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste Tukey (5%). Cada coluna representa a média \pm erro padrão (n = 4).

O conteúdo relativo de água (CRA) apresentou diferença estatística ($P < 0,0000$) entre os tratamentos irrigados e sob déficit hídrico. Comparando o CRA do mesmo tratamento em diferentes condições hídricas, observou-se que o tratamento inoculado com *R. clarum* em solo natural apresentou a menor redução do conteúdo relativo de água, em comparação a redução nos demais tratamentos (Figura 10).

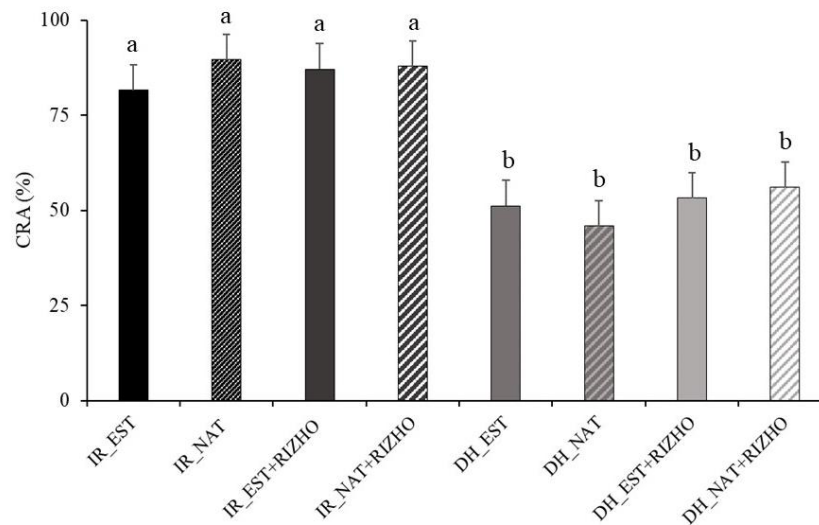


Figura 10 - Conteúdo relativo de água em plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). Cada coluna representa a média \pm erro padrão (n = 4).

Os valores de água da parte aérea (APA) apresentaram diferença estatística ($P < 0,0000$). A APA das plantas do tratamento IR_NAT-RIZHO foi superior à dos tratamentos IR_EST+RIZHO e IR_EST (Figura 11).

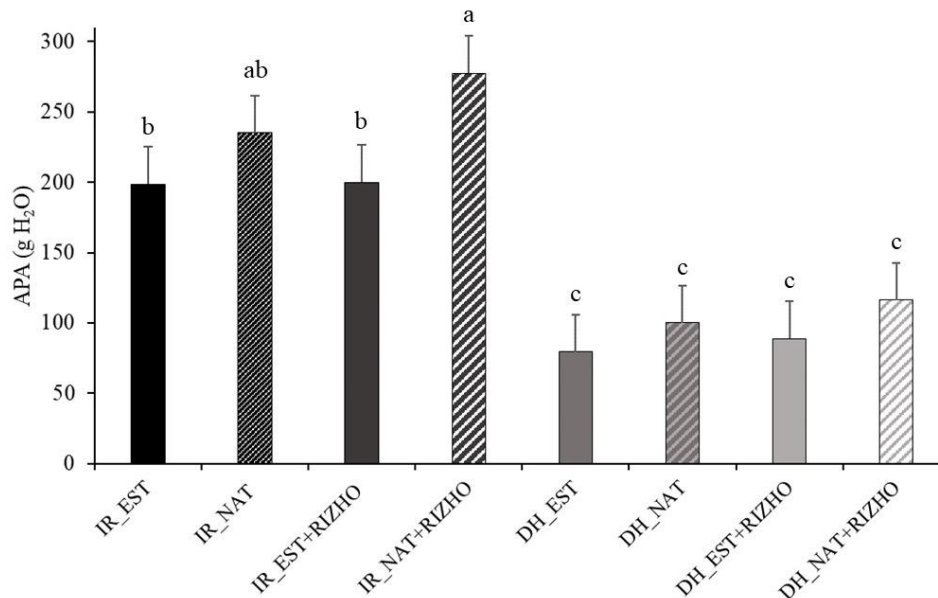


Figura 11 – Valores médios de água da Parte Aérea em plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). Cada coluna representa a média \pm erro padrão (n = 4).

O conteúdo de prolina em plantas de milho apresentou diferença estatística ($P < 0,00$), conforme mostrado na Figura 12. A prolina nas plantas de milho do tratamento DH_NAT foram significativamente superiores aos dos tratamentos DH_EST, DH_EST-RIZHO e

DH_NAT+RIZHO. Nas condições irrigadas não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos.

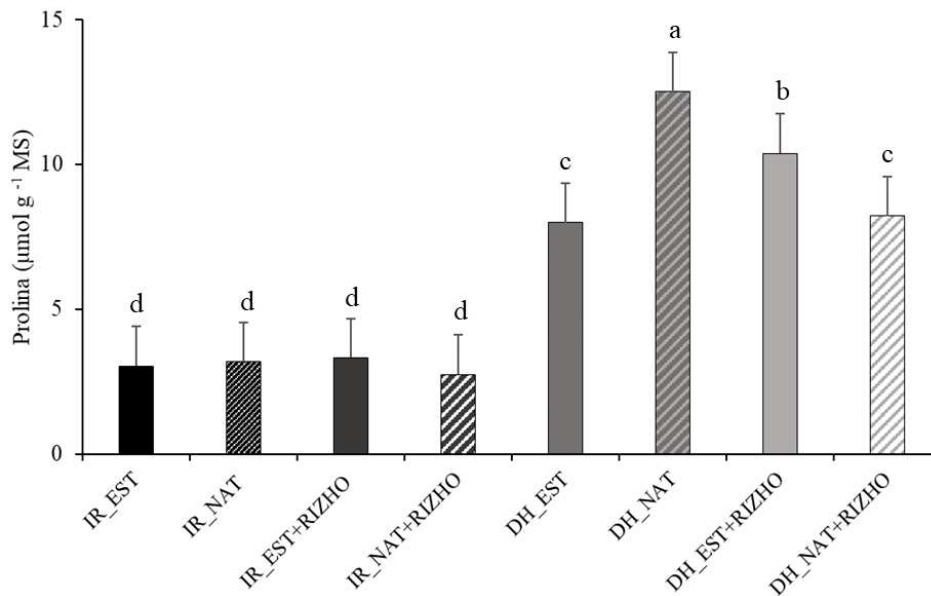


Figura 12 – Valores médios do conteúdo de prolina em plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: Rizhoglomus clarum. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste Tukey (5%). Cada coluna representa a média ± erro padrão (n = 4).

O conteúdo de carboidratos solúveis totais em plantas de milho apresentou diferença estatística ($P < 0,00$) entre os tratamentos irrigados e sob déficit hídrico (Figura 12). Em condições de déficit hídrico, verificou-se que o conteúdo de carboidratos foi 85% menor em comparação com as plantas irrigadas. Além disso, o tratamento IR_EST + RIZHO apresentou uma média 114,1% maior em relação ao tratamento DH_EST + RIZHO. Da mesma forma, o tratamento IR_NAT+RIZHO foi 95,3% maior em comparação com o tratamento DH_NAT+RIZHO.

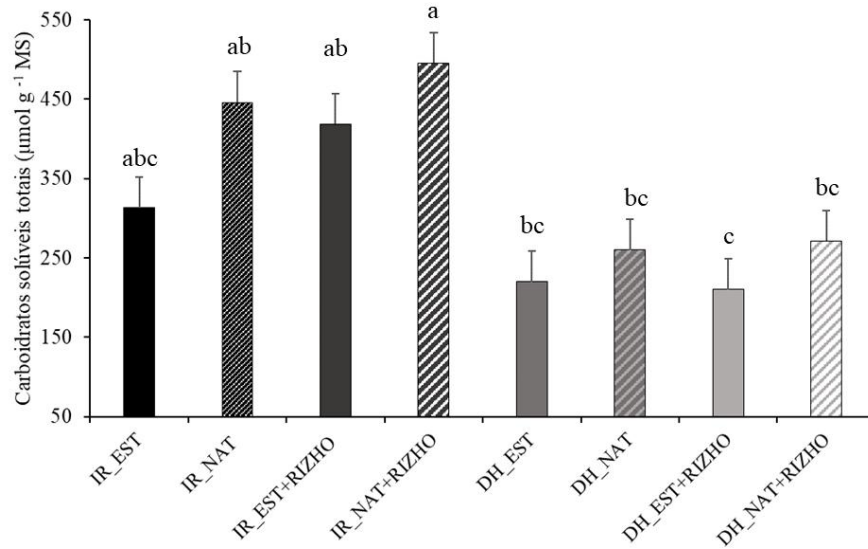


Figura 13 – Valores médios do conteúdo de carboidrato em plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: Rizhoglomus clarum. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste Tukey (5%). Cada coluna representa a média \pm erro padrão (n = 4).

O índice de intensidade de verde nas plantas de milho apresentou diferença estatística aos 4 dias após o déficit hídrico (DADH) no período da manhã ($P < 0,05$), nos demais dias e no período da tarde não houve diferença estatística (Figura 14).

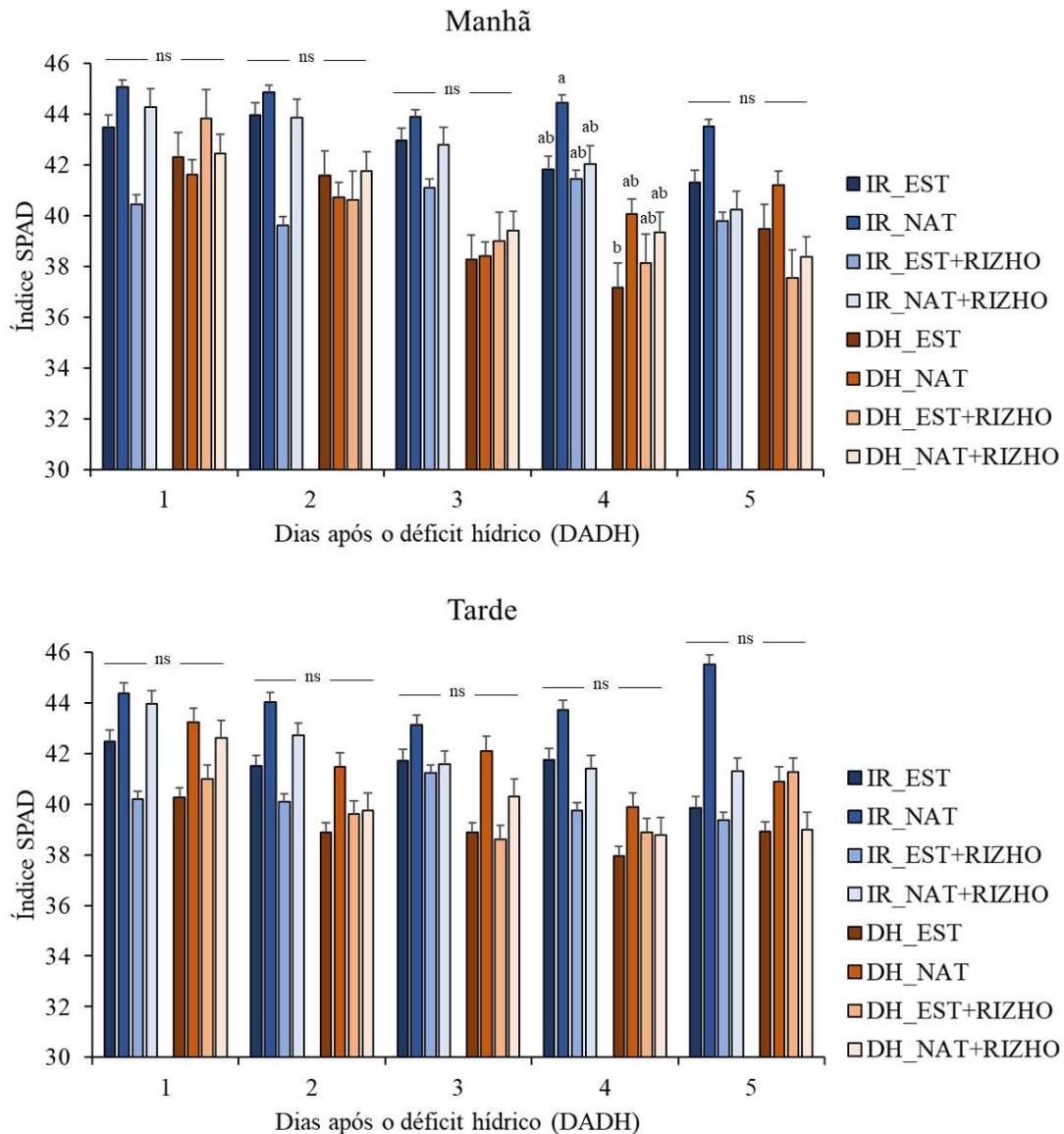


Figura 14 – Valores médios de índice de Intensidade de verde de plantas de milho (manhã e tarde) irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras entre os tratamentos no dia de avaliação não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). ns: não significativo. Cada coluna representa a média ± erro padrão (n = 4).

Ao avaliar os parâmetros de fluorescência da clorofila *a*, foram observadas variações significativas nas razões F_v/F_m , F_v/F_0 e PI_{ABS} . A relação F_v/F_0 apresentou diferença estatística no 3º DADH (manhã e tarde) e no 5º DADH à tarde ($P < 0,01$). Contudo, não houve diferença entre os tratamentos irrigados e sob estresse no 3º DADH pela manhã. No 3º DADH, no período da tarde, o tratamento DH_EST+RIZHO foi 126,7% maior quando comparado com DH_EST. No 5º DADH, no período da tarde, os tratamentos não diferiram entre si (Figura 15).

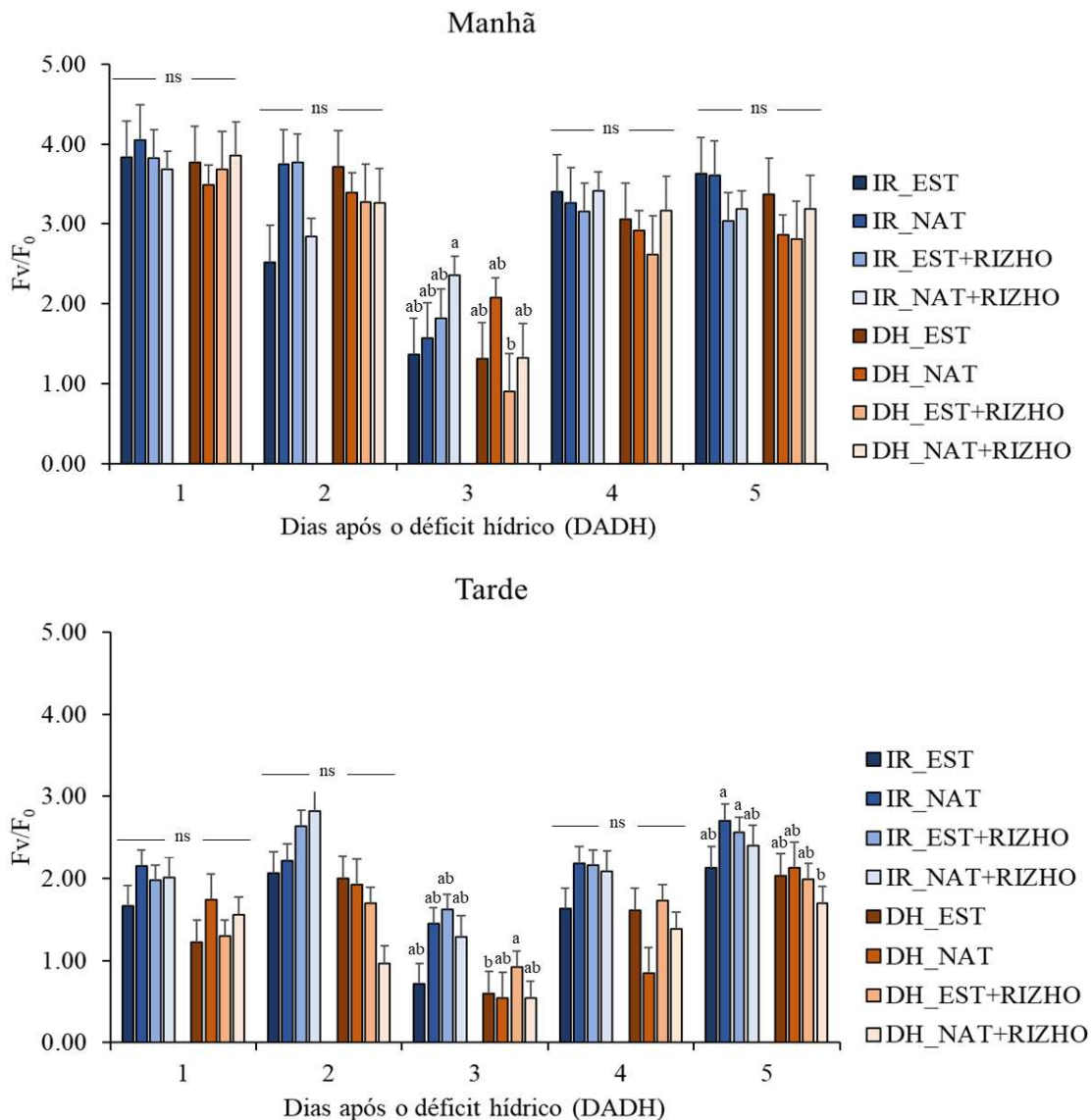


Figura 15 – Valores médios da eficiência primária (F_v/F_0) de plantas de milho (manhã e tarde) irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras entre os tratamentos no dia de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey (5%). ns: não significativo. Cada coluna representa a média \pm erro padrão ($n = 4$).

A relação F_v/F_m apresentou diferença estatística no 3º DADH pela manhã ($P < 0,01$), e no 2º, 3º, 4º e 5º DADH no período da tarde ($P < 0,000$, $P < 0,006$, $P < 0,003$ e $P < 0,04$, respectivamente). No 3º DADH pela manhã o tratamento DH_NAT+RIZHO foi 23,2% maior quando comparado ao tratamento DH_EST. O tratamento IR_NAT+RIZHO foi 50% maior quando comparado com IR_EST; assim como, o tratamento com IR_RIZHO foi 14,7% maior quando comparado o tratamento IR_EST. No período da tarde o tratamento DH_NAT+RIZHO foi maior 52,9% em média, quando comparado ao tratamento DH_EST.

Já o tratamento com DH_RIZHO foi 56,6% maior quando comparado com o tratamento DH_EST. O F_v/F_m no tratamento IR_NAT+RIZHO foi 11,4% maior quando comparado ao

tratamento IR_EST; e quando comparado ao tratamento com IR_RIZHO houve aumento de 14,3% (Figura 16).

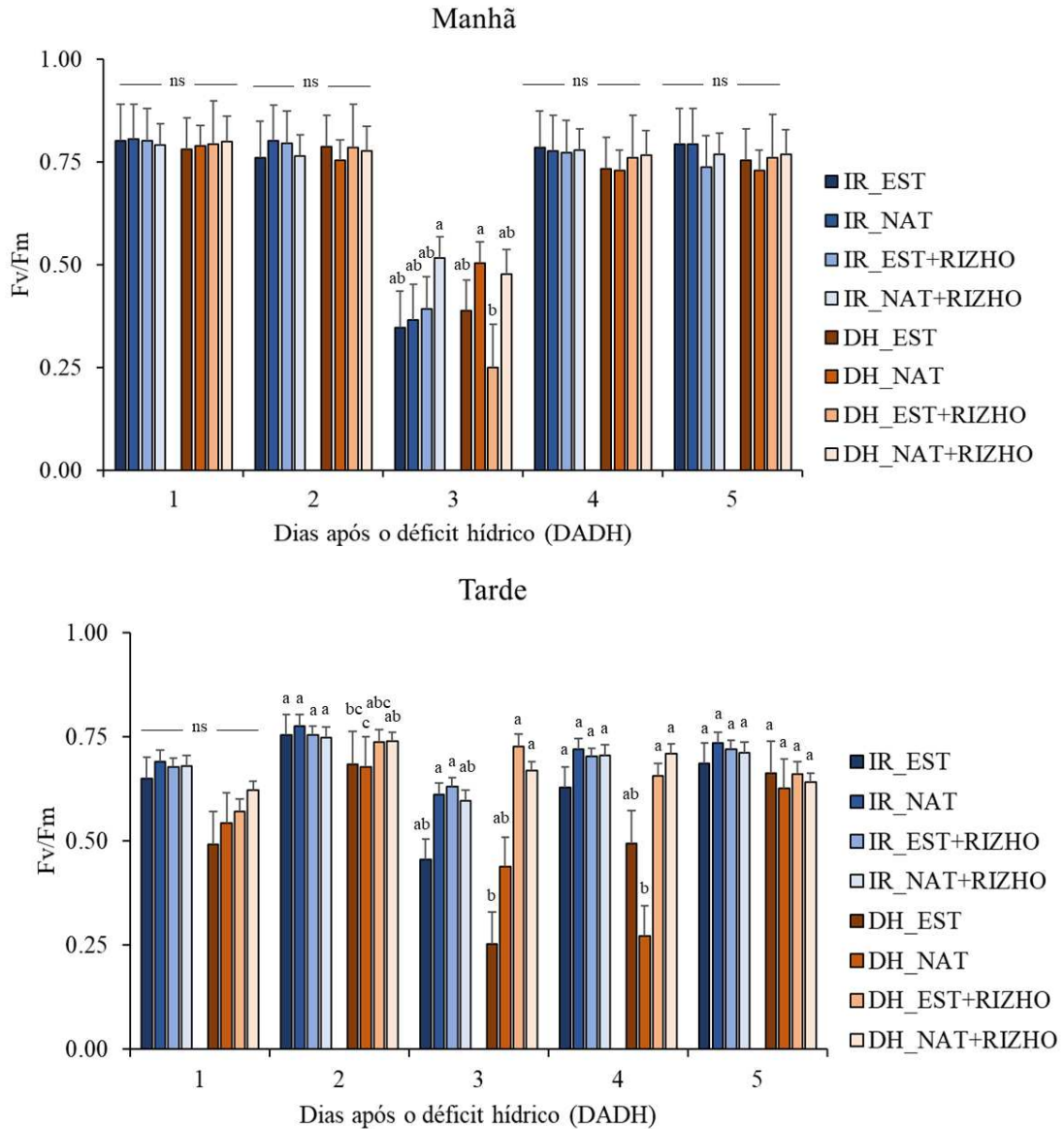


Figura 16 - Eficiência quântica máxima do fotossistema II (F_v/F_m) de plantas de milho (manhã e tarde) irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras entre os tratamentos no dia de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey (5%). ns: não significativo. Cada coluna representa a média \pm erro padrão ($n = 4$).

Para o PI_{ABS} no período da manhã observou-se que as médias foram estatisticamente diferentes nos 3º e 5º DADH ($P < 0,003$ e $P < 0,0001$, respectivamente), com diferença entre os tratamentos irrigados e sob estresse. Sendo que os tratamentos irrigados no período da manhã no dia 3º e 5º DADH tiveram maiores médias que os tratamentos sob estresse. No período da

tarde as médias apresentaram diferença estatística no 1º, 3º e 5º DADH ($P < 0,000$). Com tratamentos irrigados apresentando as maiores médias, com exceção para o dia 1º DADH, em que o tratamento sob déficit hídrico com solo natural (DH_NAT) apresentou média superior a todos os demais tratamentos. Nos 3º e 5º DADH no período da tarde os tratamentos sob estresse tiveram menores médias quando comparados com os tratamentos irrigados. No entanto, para as condições de plantas bem irrigadas, o tratamento IR_RIZHO foi 43,9% maior do que no solo IR_EST no 3º DADH. Já no 5º DADH o tratamento IR_NAT foi 70,7% maior quando comparado ao tratamento IR_EST (Figura 17).

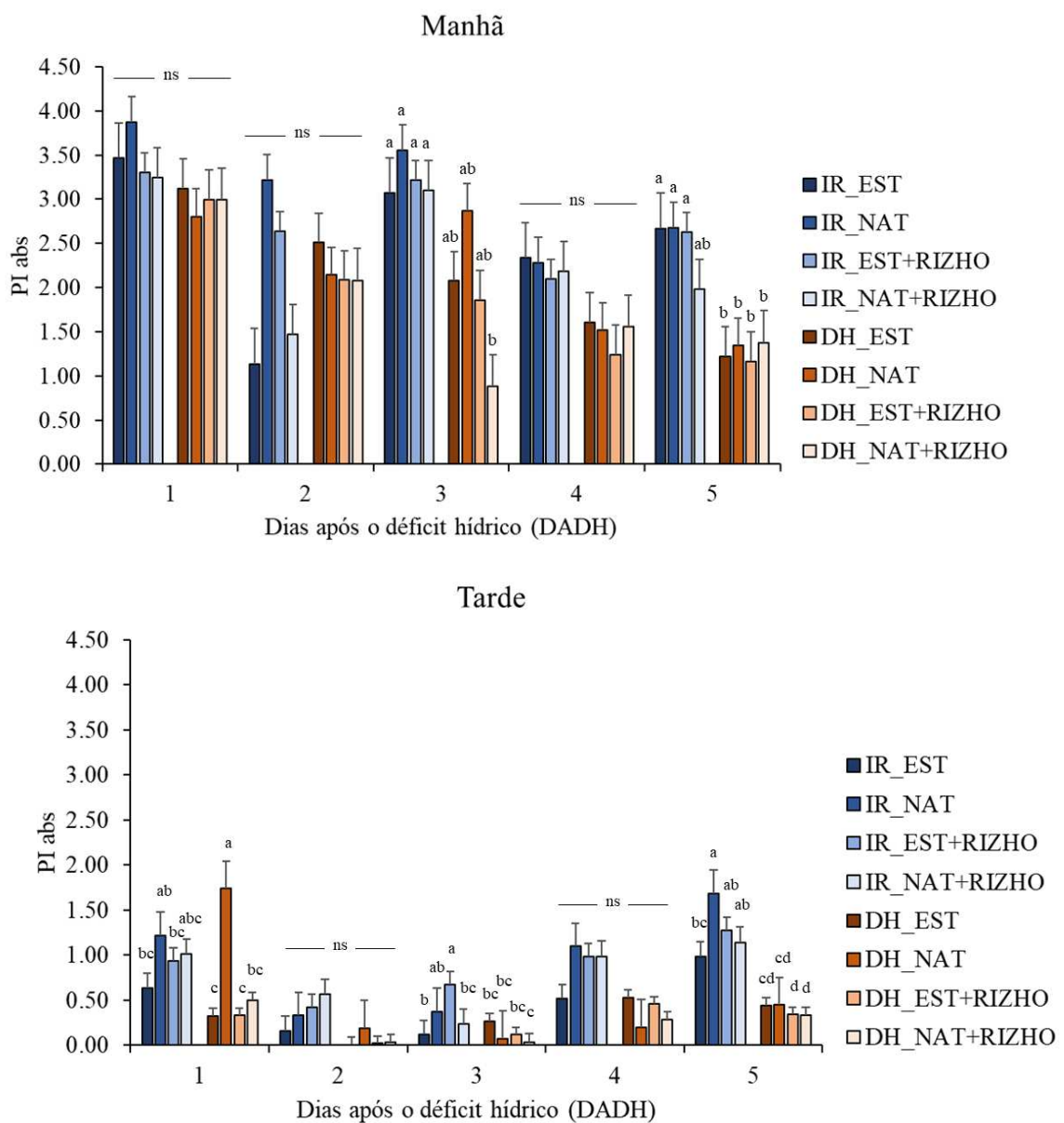


Figura 17 – Valores médios do índice de desempenho (PI_{ABS}) de plantas de milho (manhã e tarde) irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO:

Rizhoglomus clarum. Médias seguidas pelas mesmas letras entre os tratamentos no dia de avaliação não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). ns: não significativo. Cada coluna representa a média \pm erro padrão ($n = 4$).

O conteúdo de clorofila *a*, *b* e clorofila total não foram estatisticamente significativos em plantas de milho ($P > 0,05$); enquanto o conteúdo de carotenoides foi estatisticamente significativo ($P < 0,03$) (Figura 18). Em condições de déficit hídrico os tratamentos não diferiram entre si, contudo em condições irrigadas o tratamento de IR_NAT teve maior média de $0.818 \mu\text{mol g}^{-1}$ do que os demais tratamentos.

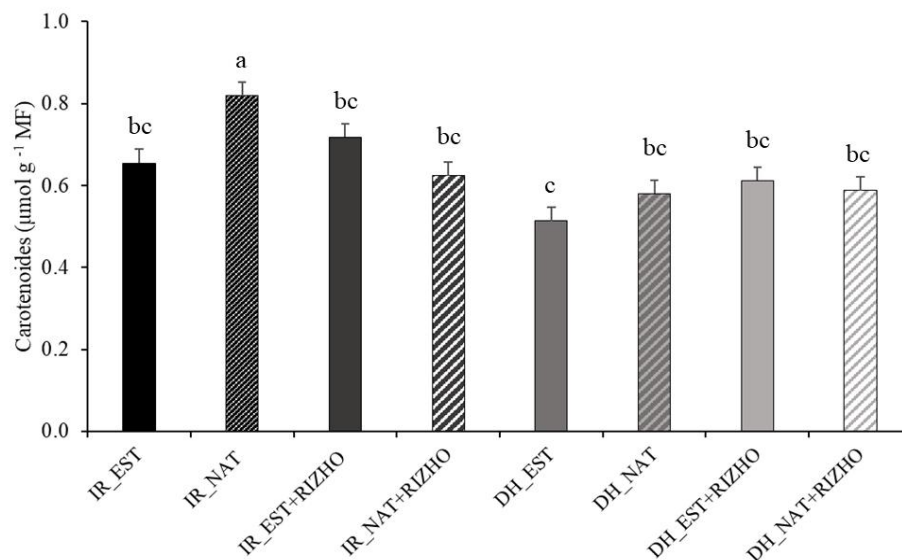


Figura 18 – Valores médios do conteúdo de carotenoides em plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%). Cada coluna representa a média \pm erro padrão ($n = 4$).

A análise de componentes principais (PCA) levou em consideração todas as variáveis estatisticamente significativas ($P < 0,05$) dos diferentes tratamentos. Dois componentes principais foram responsáveis por 90,1% da variabilidade observada nos dados, com 80,5% para Eixo 1 e 9,6% para Eixo 2 (Figura 19). Na condição não estressada, a análise de PCA mostrou correlação positiva entre os diferentes tratamentos irrigados (inoculados ou não com FMA) para crescimento, biomassa fresca e seca, carboidratos e conteúdo relativo de água, que foram altamente correlacionados entre si. A análise também confirmou o impacto negativo da deficiência hídrica nestes parâmetros. Em condições de estresse, o PCA mostrou uma clara correlação positiva do conteúdo de prolina com o tratamento inoculado e o de solo nativo. Assim como, a quantidade de água na parte aérea teve correlação positiva com o tratamento de solo nativo inoculado com FMA.

PCA - Biplot

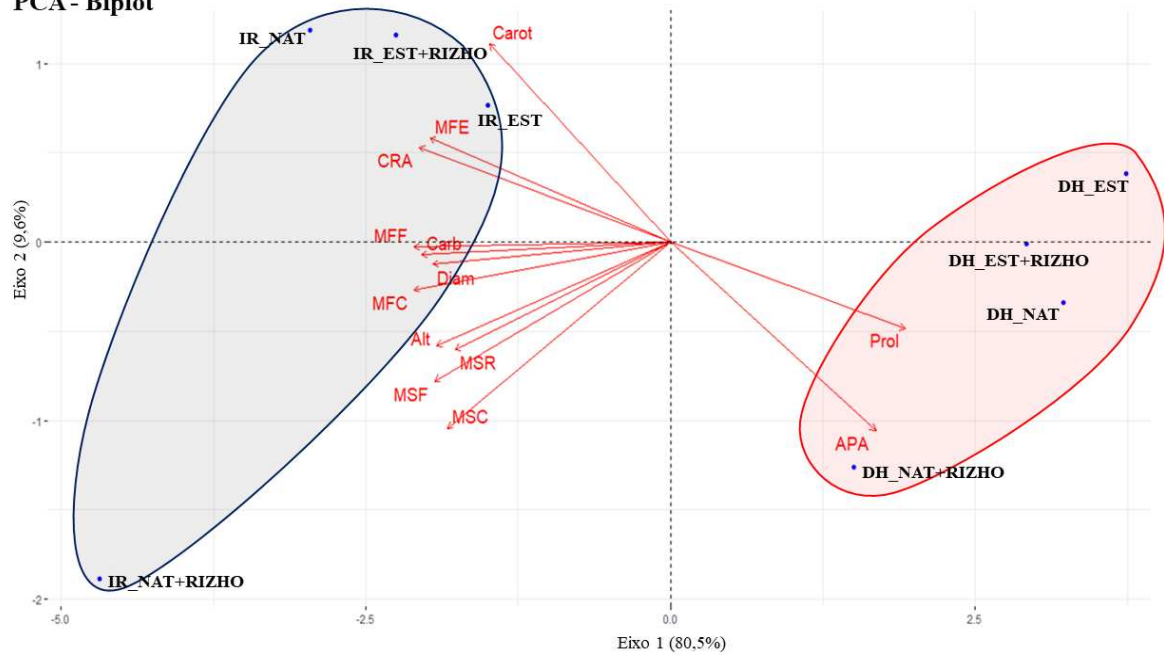


Figura 19 – Análises de Componentes Principais (PCA) em plantas de milho irrigadas e sob déficit hídrico com inoculação de FMA. IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: Rizhoglomus clarum. Prol: Prolina, APA: Água da Parte Aérea, Carot: Carotenoide, MFE: Massa Foliar Específica, CRA: Conteúdo Relativo de água, MFF: Massa Fresca Foliar, Carb: Carboidrato, Diam: Diâmetro, MFC: Massa Fresca do Colmo, Alt: Altura, MSR: Massa Seca das Raízes, MSF: Massa Seca da Folha, MSC: Massa Seca do Colmo. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste Tukey (5%). Cada coluna representa a média \pm erro padrão (n = 4).

6 DISCUSSÃO

Neste estudo, embora a inoculação não tenha influenciado a altura das plantas, observou-se um desempenho significativo no diâmetro do colmo e na produção de biomassa nas plantas de milho inoculadas com *Rizhoglomus clarum*, tanto em condições irrigadas quanto de deficiência hídrica (Figuras 5, 8 e 9). Em um estudo realizado por El-Fattah *et al.* (2023) com plantas de milho inoculadas com FMAs, foi observado que as plantas inoculadas apresentaram um melhor desempenho no crescimento vegetativo, na produção de biomassa e na eficiência do uso de água em condições de seca, em comparação com as plantas não inoculadas. Esses resultados positivos foram atribuídos à maior distribuição radicular proporcionada pela simbiose de micorrizas, incluindo uma expansão radicular profunda e rápida, resultando em uma maior biomassa nas plantas inoculadas em comparação com as não inoculadas.

O aumento no diâmetro das plantas indica um efeito positivo da inoculação com FMAs no crescimento e desenvolvimento das plantas de milho, demonstrando o potencial desses microrganismos como promotores de crescimento vegetal (Agbodjato *et al.*, 2022). Bahraminia *et al.* (2020) também observaram um efeito positivo no crescimento das plantas de milho inoculadas com FMAs sob déficit hídrico.

A seca pode afetar o crescimento do milho de várias maneiras, incluindo a redução da disponibilidade de água, a diminuição da área foliar, a redução do crescimento do sistema radicular e a diminuição da taxa de fotossíntese e eficiência do uso da água, o que, por conseguinte, pode afetar significativamente o desenvolvimento do milho (Avramova *et al.*, 2016). Logo, a mensuração da área foliar (AF) pode ajudar na avaliação do estado fisiológico das espécies vegetais, quanto maior for a AF espera-se que maior será a superfície de interceptação de luz, implicando em maiores taxas fotossintéticas nas plantas (Luiz *et al.*, 2006; Pinheiro *et al.*, 2020).

A inoculação com *R. clarum* em solo natural sob déficit hídrico (DH_NAT+RIZHO) aumentou significativamente a AF em relação ao tratamento estéril sem inoculação (DH_EST) em plantas de milho aos 50 e 51 dias após plantio (DAP) (Figura 6). Agbodjato *et al.* (2022) também observaram uma influência positiva dos FMAs como bioestimulantes na AF e em outras variáveis de crescimento em plantas de milho em um ambiente controlado.

A massa foliar específica (MFE) em plantas de milho foi reduzida em condições de estresse (Figura 7). No tratamento DH_NAT+RIZHO a MFE apresentou comportamento

semelhante ao tratamento IR_NAT, demonstrando que a inoculação de FMA influenciou de forma positiva a MFE em planta de milho.

A MFE é um parâmetro que está relacionada à densidade foliar e à eficiência no uso da água pelas plantas. MFE demonstra uma considerável variabilidade dependendo do fluxo de fótons, do estado de água do solo e do momento do dia. Quando as condições ambientais têm um efeito depressivo maior na taxa de expansão do que na fotossíntese, a MFE é aumentada, e é reduzida no caso oposto (Tardieu; Granier; Muller, 1999). Para Zhang et al. (2020), a relação entre a área foliar e a massa foliar é importante para maximizar a eficiência fotossintética das plantas. Além disso, a MFE é definida como a relação entre a área foliar e a massa seca da folha, ou seja, quanto maior a área foliar em relação à massa seca, maior é a MFE.

O uso de biotecnologias como a inoculação de fungos micorrízicos podem desempenhar um papel importante no aumento da biomassa das plantas, especialmente em condições de estresse. A massa seca da parte área apresentou um aumento significativo no tratamento com DH_NAT+RIZHO em comparação ao tratamento DH_EST. Por outro lado, em condições irrigadas, a biomassa (massa fresca e seca) do milho mostrou diferença significativa em comparação com o tratamento sem inoculação. Resultados semelhantes foram encontrados em plantas de milho crioulo, em que a presença dos FMA foi fundamental no crescimento e desenvolvimento, proporcionando benefícios em termos de nutrição, resistência a estresses ambientais e redução do uso de fertilizantes, contribuindo para uma produção mais eficiente e sustentável (Sales *et al.*, 2021). Os FMAs além de serem primordiais para diminuir os efeitos negativos do déficit hídrico, tem demonstrado melhora significativa na massa seca e na área foliar sob condições de estresse abiótico (Xu; Lu; Tong, 2018).

Dessa forma, a interação entre plantas e FMAs resulta em um aumento da absorção de nutrientes e água pelas plantas, melhora a tolerância a estresses ambientais e promove o crescimento vegetativo no milho (Sales *et al.*, 2021). Alguns mecanismos pelos quais os fungos micorrízicos arbusculares podem influenciar positivamente o crescimento do milho é o aumento da absorção direta e transferência de água e nutrientes através das hifas do fungo para a planta hospedeira, o que mitiga estresses abióticos e aumenta o estímulo do crescimento radicular (Tian *et al.*, 2013; Ren *et al.*, 2019).

A inoculação de FMA melhora o estado hídrico das plantas de milho sob estresse de alta temperatura, ajudando na absorção de água pelas plantas hospedeiras por meio de hifas externas, frequentemente associada ao aumento da condutividade hidráulica da raiz ou da planta para o fluxo de água, e ao ajuste favorável do equilíbrio osmótico e da composição de

carboidratos, além disso, plantas de milho com micorrizas apresentaram o conteúdo relativo de água (CRA) mais elevado do que as plantas sem micorrizas (Zhu *et al.*, 2011).

O CRA é um indicador importante da disponibilidade de água para as plantas, afetando diretamente a taxa fotossintética, a produção de matéria seca e, conseqüentemente, a produtividade (Ashraf *et al.*, 2020). Santos *et al.* (2023) constataram que os tratamentos inoculados com FMAs apresentaram maior conteúdo relativo de água nas folhas, indicando que os fungos podem contribuir para uma maior eficiência na absorção de água, potencialmente tornando as plantas mais tolerantes ao déficit hídrico. Isso sugere que o uso de FMA pode ser benéfico para melhorar o *status* hídrico das plantas de milho, o que é crucial para o seu crescimento e produtividade geral. O conteúdo relativo de água é reduzido quando as plantas são submetidas ao déficit hídrico, e apesar do que é relatado na literatura, que os FMAs ajudam no *status* hídrico de plantas de milho, nesse trabalho não foi verificada influência significativa dos FMA no CRA (Figura 10).

A quantidade de água da parte aérea (APA) desempenha múltiplas funções essenciais para o funcionamento saudável e a sobrevivência das plantas, é importante para os processos fisiológicos, incluindo fotossíntese, transpiração e transporte de nutrientes. Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) auxiliam na manutenção do conteúdo de água da parte aérea das plantas. Resultados semelhantes foram encontrados por Ait-El-Mokhtar *et al.* (2020), onde a aplicação de FMAs resultou em uma melhoria significativa no *status* hídrico das plantas sob estresse, conforme evidenciado pelos maiores valores de conteúdo de água nas folhas. Essa melhoria pode ser atribuída ao aumento da condutividade hidráulica e da capacidade de absorção de água mediadas pelas micorrizas.

O acúmulo de prolina é um mecanismo importante para melhorar a tolerância das plantas à seca, pois ajuda a proteger as proteínas e membranas contra danos oxidativos causados pelo estresse. A prolina é um aminoácido que atua como um osmólito compatível, ajudando as plantas a manterem a homeostase osmótica e a lidar com o estresse hídrico. A prolina também desempenha um papel na regulação do metabolismo do nitrogênio e no equilíbrio osmótico das células sob condições de estresse, contribuindo para a sobrevivência das plantas em ambientes adversos. Além da prolina, os açúcares são carboidratos que desempenham um papel importante como antioxidantes, ajudando a regular a sinalização de espécies reativas de oxigênio (EROs) e a tolerância ao estresse abiótico (Begum *et al.*, 2019).

Tanto a prolina quanto os carboidratos apresentaram valores mais elevados nos tratamentos com a inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), resultando em um

aumento no teor de solutos compatíveis. Esse acúmulo de solutos compatíveis auxilia na manutenção do teor relativo de água das plantas, contribuindo para sua adaptação ao estresse hídrico, esses resultados são corroborados por Begum *et al.* (2019).

Avramova *et al.* (2016) observaram que sob condições de déficit hídrico houve uma diminuição significativa nos valores do índice de intensidade de verde, indicando uma redução na concentração de clorofila nas folhas de milho devido ao estresse. Isso sugere um impacto negativo na eficiência fotossintética das plantas devido ao estresse hídrico. Apesar de Yan *et al.* (2022) constatarem que a inoculação de FMA melhorou a intensidade de verde e os parâmetros fotossintéticos indicando que a colonização de FMAs ajudou na tolerância das plantas à seca, no presente estudo não foi observado influência da inoculação de FMA na intensidade de verde (Figura 14).

A fluorescência da clorofila *a* é um indicador do estado do fotossistema II e reflete a eficiência com que o FSII utiliza a energia absorvida pela clorofila (Ye; Wang; Li., 2022). De acordo com Murchie e Lawson (2013), a análise da fluorescência da clorofila *a* é uma ferramenta essencial para avaliar a eficiência fotossintética das plantas e detectar mecanismos fisiológicos durante situações de estresse biótico e abiótico. A relação F_v/F_m é um indicador da eficiência fotoquímica e da saúde das plantas, enquanto a relação F_v/F_0 e PI_{ABS} são medidas que fornecem informações sobre a eficiência do fotossistema II em condições de luz ambiente. Valores mais altos indicam uma maior eficiência do FSII, enquanto valores mais baixos podem indicar estresse ou danos nas plantas. Chen *et al.* (2016) observaram que o déficit hídrico reduz a eficiência quântica máxima do fotossistema II (F_v/F_m), mas esse efeito varia em sua gravidade entre as diferentes linhagens de milho.

A inoculação de fungos micorrízicos arbusculares em plantas de milho submetidas ao estresse hídrico tem sido associada a uma melhoria na absorção de nutrientes e água do solo, resultando em um melhor estado fisiológico das plantas. Isso se deve à redução do dano oxidativo, ao aumento da capacidade de transporte de água pelas raízes e à facilitação da troca entre o espaço apoplástico e célula-a-célula (Quiroga *et al.*, 2017). Além disso, a inoculação de fungos micorrízicos arbusculares melhora o desempenho do FSII em condições de seca, ao aprimorar a absorção de água, estabilizar os cloroplastos e a estrutura da membrana, aumentar o conteúdo de Rubisco e reduzir o acúmulo de radicais livres.

Em estudo anterior a inoculação de FMA mostrou que os fungos podem melhorar a capacidade da planta de dissipar a energia em excesso, reduzir o *quenching* não fotossintético e melhorar a eficiência do fotossistema II (Porcel *et al.*, 2015). O estudo com milho inoculado

com FMA demonstrou um aumento significativo no índice de clorofila em comparação com as plantas não inoculadas, indicando uma melhoria na eficiência fotossintética das plantas sob déficit hídrico (Maia et al., 2020). Zhu et al. (2011) mencionam que a simbiose de FMA aumentou a eficiência fotoquímica do FSII em plantas de milho sob estresse de alta temperatura. Outro estudo demonstrou que a fotossíntese foi nitidamente reduzida sob estresse térmico durante os estágios do milho o que reduziu principalmente os teores da taxa de fotossíntese e clorofila e a produtividade (Zhang et al., 2023).

Portanto, os resultados deste estudo indicam que a inoculação com FMA teve um impacto significativo nas análises de fluorescência da clorofila *a* e no crescimento das plantas. Isso sugere que tanto a resposta da biomassa quanto a da fluorescência podem ser indicadores importantes para avaliar a tolerância à seca em plantas de milho inoculadas com FMA, o que também foi evidente na eficiência fotossintética das mesmas. A eficiência fotossintética das plantas foi afetada pelo déficit hídrico, com os tratamentos irrigados apresentando médias maiores em comparação aos tratamentos submetidos à condição de déficit hídrico (Figura 16).

Os carotenoides são conhecidos por desempenhar um papel importante na proteção das plantas contra o estresse oxidativo, atuando como antioxidantes e ajudando a neutralizar danos causados pela luz intensa, protegendo assim os tecidos da fotoinibição ou do estresse oxidativo (Hazrati *et al.*, 2016). Neste estudo, foi observado que o solo natural sem inoculação, que também tinha a presença dos FMAs nativos, influenciou na obtenção de níveis mais elevados de carotenoides em plantas de milho em condições irrigadas, em comparação com o tratamento estéril. Esses resultados são consistentes com as descobertas de Begum *et al.* (2019).

A influência do FMA foi estudada sob condições de irrigação adequada e deficiência hídrica, em conjunto os resultados indicam que a aplicação de FMAs atuou nas plantas de milho de forma sinérgica por meio de processos fisiológicos e bioquímicos (Figura 18). Independente da condição hídrica os FMAs promoveram o crescimento das plantas, quando comparados aos tratamentos não inoculados. Sob irrigação foi observado a atuação dos FMAs inoculado no solo nativo na biomassa, altura, diâmetro e carboidratos, que corroboram estudos da sua atuação na promoção do crescimento (Yooyongwech *et al.*, 2018; Agbodjato *et al.*, 2022; Juntahum; Ekprasert; Boonlue *et al.*, 2022). Os resultados mostraram o acúmulo de prolina nas plantas sob estresse hídrico e inoculadas com FMAs (Figura 12), comprovando o acúmulo de solutos orgânicos para regular o potencial osmótico das células (Bhardwaj *et al.*, 2022).

7 CONCLUSÕES

A presença de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), no solo tanto nativos quanto inoculados, foi capaz de mitigar alguns dos efeitos negativos do déficit hídrico, resultando em um impacto significativo no crescimento das plantas de milho. A inoculação com *Rizhoglomus clarum* influenciou positivamente a altura, diâmetro do colmo, produção de biomassa, quantidade de água na parte aérea, área foliar, conteúdo de prolina, e os parâmetros de fluorescência da clorofila *a*.

Esses resultados sugerem que a presença dos FMAs pode contribuir para aumentar a tolerância das plantas de milho ao estresse hídrico. Assim, a utilização de fungos micorrízicos arbusculares apresenta-se como uma estratégia promissora para melhorar a produtividade e a resiliência das plantas de milho diante de cenários de escassez de água, destacando seu potencial como uma abordagem sustentável e inovadora na agricultura.

REFERÊNCIAS

- ABDELAAL, K. A. A. *et al.* Effect of some osmoregulators on photosynthesis, lipid peroxidation, antioxidative capacity, and productivity of barley (*Hordeum vulgare* L.) under water deficit stress. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 30199-30211, 2018.
- AGBODJATO, N. A. *et al.* Formulation of biostimulants based on arbuscular mycorrhizal fungi for maize growth and yield. **Frontiers in Agronomy**, v. 4, p. 894489, 2022.
- AIT-EL-MOKHTAR, M. *et al.* Alleviation of detrimental effects of salt stress on date palm (*Phoenix dactylifera* L.) by the application of arbuscular mycorrhizal fungi and/or compost. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 131, 2020.
- AKRAM, M. A. *et al.* Estudo comparativo de seis cultivares de milho (*Zea mays* L.) quanto à absorção, partição e tolerância de cádmio. **Appl. Eco. Ambiente. Res.** vol. 19, p. 2305–2331. 2021.
- ANJUM, S. A. *et al.* Osmolyte accumulation and antioxidant metabolism in drought-stressed maize (*Zea mays* L.) hybrids. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. 69, p. 1-16. 2017. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.00069/full>.
- ASHRAF, A. M *et al.* Investigating the effect of in situ water harvesting and stress management practices on relative leaf water content, leaf proline and yield of cotton under rainfed vertisol. **New Perspectives in Agriculture and Crop Science**, 3, 163-170. 2020.
- AVRAMOVA, V. *et al.* Beemster, Screening for drought tolerance of maize hybrids by multi-scale analysis of root and shoot traits at the seedling stage, **Journal of Experimental Botany**, Volume 67, Issue 8, April 2016, Pages 2453–2466, <https://doi.org/10.1093/jxb/erw055>.
- BAHRAMINIA, M *et al.* Ionomic and biochemical responses of maize plant (*Zea mays* L.) inoculated with *Funneliformis mosseae* to water-deficit stress. **Rhizosphere**, v. 16, p. 100269, 2020.
- BATES, L. S; WALDREN, R. P. A.; TEARE, I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and soil**, v. 39, p. 205-207, 1973.
- BEGUM, N *et al.* Improved drought tolerance by AMF inoculation in maize (*Zea mays*) involves physiological and biochemical implications. **Plants**, v. 8, n. 12, p. 579, 2019.
- BHARDWAJ, A. K.; CHANDRA, K. K.; KUMAR, R. Water stress changes on AMF colonization, stomatal conductance and photosynthesis of *Dalbergia sissoo* seedlings grown in entisol soil under nursery condition. **Forest Science and Technology**, v. 19, n. 1, p. 47-58, 2023.

BOLHAR-NORDENKAMPF, H. R. *et al.* Chlorophyll fluorescence as a probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: a review of current instrumentation. **Functional Ecology**, p. 497-514. 1989.

BRUNDRETT, M.C., TEDERSOO, L. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. **New Phytol.** v. 220, p. 1108–1115. 2018.

BUCHER, S. F.; BERNHARDT–RÖMERMANN, M.; RÖMERMANN, C. Chlorophyll fluorescence and gas exchange measurements in field research: An ecological case study. **Photosynthetica**, v. 56, p. 1161-1170, 2018.

CARMO-SILVA, A. E. *et al.* Rubisco activities, properties, and regulation in three different C4 grasses under drought. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 9, p. 2355-2366, 2010.

CHEN, D. *et al.* Genotypic variation in growth and physiological response to drought stress and re-watering reveals the critical role of recovery in drought adaptation in maize seedlings. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 1241, 2016.

CHEN, W. *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and physiological performance of *Catalpa bungei* CA Mey. under drought stress. **Forests**, v. 11, n. 10, p. 1117, 2020.

CHEN, Y-L. *et al.* The role of arbuscular mycorrhizal fungi in soil nitrogen cycling. **Acta Ecologica Sinica**, v. 34, n. 17, 2014. DOI: 10.5846/stxb201309242346.

CONAB, Companhia Nacional De Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 11, safra 2023/24, n. 3 terceiro levantamento, dezembro 2023.

CONAB, Companhia Nacional De Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 11, safra 2023/24, n. 5 quinto levantamento, fevereiro 2024.

COSTA, F. M. *et al.* Crescimento de milho crioulo cultivado com fungos micorrízicos arbusculares. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 13, n. 3, p. 983-1000, 2020.

DENG, S. *et al.* Effects of Cd Stress on Morphological and Physiological Characteristics of Maize Seedlings. **Agronomy**, v. 14, n. 2, p. 379, 2024.

DUBOIS, M. *et al.* Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical chemistry**, v. 28, n. 3, p. 350-356, 1956.

EL-FATTAH, D. A. A. *et al.* Role of mycorrhizae in enhancing the economic revenue of water and phosphorus use efficiency in sweet corn (*Zea mays* L. var. *saccharata*) plants, **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 22, n. 3, p. 174-186, 2023.

ERENSTEIN, O. *et al.* Produção, consumo e comércio global de milho: tendências e implicações de P&D. Sec. **Alimentar**, v.14, p. 1295–1319, 2022.

FAO, Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. **Relatório de Produção Mundial de 2021**. Disponível em: <<http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/>>.

FERNANDES, H. M. F. *et al.* Desenvolvimento inicial do milho em resposta ao tratamento de sementes com fertilizante e disponibilidade hídrica. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, v. 16, n. 9, p. 17440-17454, 2023.

FOLLI-PEREIRA, M. S. *et al.* Arbuscular mycorrhiza and plant tolerance to stress. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1663-1679, 2012.

FRESNO, D H.; SOLÉ-CORBATÓN, H; MUNNÉ-BOSCH, S. Water stress protection by the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizoglyphus irregularis* involves physiological and hormonal responses in an organ-specific manner. **Physiologia Plantarum**, v. 175, n. 1, p.13854, 2023.

GARCÍA, J. E. *et al.* Inoculation with *Azospirillum argentinense* Az19 improves the yield of maize subjected to water deficit at key stages of plant development. **Revista Argentina de Microbiologia**, 2023.

GERDEMANN, J.W.; NICOLSON, T. H. Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil wet sieving and decanting. **Transactions of British Mycological Society**, v. 46, n. 2, p. 235-244, 1963.

GHOLINEZHAD, E. *et al.* Effect of mycorrhizal inoculation in reducing water stress in sesame (*Sesamum indicum* L.): The assessment of agrobiological traits and enzymatic antioxidant activity. **Agricultural Water Management**, v. 238, p. 106234, 2020.

GIOVANNETTI, M.; MOSSE, B. An evaluation of techniques to measure vesicular-arbuscular mycorrhizal infection on roots. **New Phytologist**, v. 84, n. 3, p. 489-500, 1980.

GOMES JÚNIOR, G. A. *et al.* Absorption of nutrients by soursop seedlings in response to mycorrhizal inoculation and addition of organic compost. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, p. 287-294, 2018.

GOTO, B. T.; JOBIM, K. Laboratório de Biologia de Micorrizas: **Aspectos gerais da taxonomia**. Disponível em: < <http://glomeromycota.wixsite.com/lbmicorrizas> >. Ago. 2023.

GUIDI, L; LO PICCOLO, E; LANDI, M. Chlorophyll fluorescence, photoinhibition and abiotic stress: does it make any difference the fact to be a C3 or C4 species? **Frontiers in plant science**, v. 10, p. 438548, 2019.

HAZRATI, S. *et al.* Effects of water stress and light intensity on chlorophyll fluorescence parameters and pigments of *Aloe vera* L. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 106, p. 141-148, 2016.

HURA, T. *et al.* Effect of long-term drought stress on leaf gas exchange and fluorescence parameters in C3 and C4 plants. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 29, p. 103-113, 2007.

IRFAN, M. *et al.* Silicon nutrition in plants under water-deficit conditions: overview and prospects. **Water**, v. 15, n. 4, p. 739, 2023.

JANEESHMA, E. *et al.* Modulations in chlorophyll a fluorescence based on intensity and spectral variations of light. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 10, p. 5599, 2022.

JENKINS, W. R. A. A rapid centrifugal flotation technique for separating nematodes from soil. **Plant Disease Reporter**, v. 48, n.9, p. 692, 1964.

JUNTAHUM, S; EKPRASERT, J; BOONLUE. Efficiency of arbuscular mycorrhizal fungi for the growth promotion of sugarcane under pot conditions. **Sugar Tech**, v. 24, n. 6, p. 1738-1747, 2022.

KASSAMBARA, A. M. F. Factoextra: Extract and visualize the results of multivariate data analyses. **R package version**, v. 1, n. 7, 2020.

KOBAE, Y. Dynamic Phosphate Uptake in Arbuscular Mycorrhizal Roots Under Field Conditions. **Frontiers in Environmental Science**, v. 6, n. 159. 2019.

LANGEROODI, A. R. S. *et al.* To what extent arbuscular mycorrhiza can protect chicory (*Cichorium intybus* L.) against drought stress. **Scientia Horticulturae**, vol. 263, 2019, p. 109109, 2020.

LI, B. *et al.* Elevated CO₂-induced changes in photosynthesis, antioxidant enzymes and signal transduction enzymes of soybean under drought stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, vol. 154, p. 105–114, 2020.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls, and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**, v. 148, p. 350–382, 1987.

LIU, Y. *et al.* Comparison of the global metabolic responses to UV-B radiation between two medicinal *Astragalus* species: An integrated metabolomics strategy. **Environmental and Experimental Botany**, vol. 176, 2019, p. 104094, 2020.

LUIZ, P. F. *et al.* Estimativa da Área Foliar do Cafeeiro Conilon a Partir do Comprimento da Folha/Estimative of Leaf Foliar Area of *Coffea canephora* Based On Leaf Length. **Ceres**, v. 53, n. 306, 2006.

MAGALHÃES, P. C *et al.* **Fisiologia do milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS., 23 p. (EMBRAPA-CNPMS. Circular Técnica, 22), 2002.

MAGALHÃES, P. C; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da Produção de Milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, p. 10 (EMBRAPA-CNPMS. Circular Técnica, 76), 2006.

- MAIA, L.C. *et al.* Species diversity of Glomeromycota in Brazilian biomes. **Sydowia** v. 72, p. 181–205, 2020.
- MENDIS S. S. *at al.* Cordsiemon II d. Effects of cover crops on soil moisture dynamics of a corn cropping system. **Soil Security**, v. 8, 2022.
- MORALES, R. G. F. *et al.* Characterization Of Tomato Plants Subjected To Water Deficit. **Scientia Agraria**, v. 16, n. 1, p. 09-17, 2015.
- MOREIRA, B.C. *et al.* Effect of inoculation of pineapple plantlets with arbuscular mycorrhizal fungi obtained from different inoculum sources multiplied by the on-farm method. **Rev. Bras. Cienc. do Solo**, v. 43, p. 1–12, 2019.
- MURCHIE, E. H, LAWSON, T. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. **Journal Exp Bot**, v. 64, n. 13, p. 3983-98, 2013.
- OEHL, F. *et al.* Advances in Glomeromycota taxonomy and classification. **IMA fungus**, v. 2, p. 191-199, 2011.
- OLIVEIRA, F. A. *et al.* Uso de bioestimulante como agente amenizador do estresse salino na cultura do milho pipoca. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 47, n. 2, p. 307-315, 2016.
- PARNISKE, M. Arbuscular mycorrhiza: The mother of plant root endosymbioses. **Nature Reviews Microbiology**, v. 6, n. 10, p. 763–775, 2008.
- PAUWELS, R; GRAEFE, J; BITTERLICH, M. An arbuscular mycorrhizal fungus alters soil water retention and hydraulic conductivity in a soil texture-specific way. **Mycorrhiza**, v. 33, n. 3, p. 165-179, 2023.
- PHILLIPS, J.M.; HAYMAN, D.S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of. infection. **Transactions of the British Mycological Society**, v. 55, n. 1, p. 158-161, 1970.
- PINHEIRO, F. S. *et al.* Leaf area of seedlings of urucum (*Bixa orellana* L.) estimated by different methods: a comparative analysis. **Ciência Florestal**, v. 30, p. 885-897, 2020.
- PIOTTO, F. A. *et al.* Estimating tomato tolerance to heavy metal toxicity: cadmium as a study case. **Environ Sci Pollut Res Int**, v. 25, n. 27, p. 27535-27544, 2018.
- PORCEL, R. *et al.* Arbuscular mycorrhizal symbiosis ameliorates the optimum quantum yield of photosystem II and reduces non-photochemical quenching in rice plants subjected to salt stress. **J Plant Physiol**. v. 1, n. 185, p. 75-83, 2015.
- QASWAR, M. *et al.* Yield sustainability, soil organic carbon sequestration, and nutrients balance under long-term combined application of manure and inorganic fertilizers in acidic paddy soil. **Soil and Tillage Research**, v. 198, p. 104569, 2020.

QUIROGA, G. *et al.* Enhanced drought stress tolerance by the arbuscular mycorrhizal symbiosis in a drought-sensitive maize cultivar is related to a broader and differential regulation of host plant aquaporins than in a drought-tolerant cultivar. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 1056, 2017.

RADFORD, P.J. Growth analysis formulae-Their use and abuse. **Crop Sci**, v. 7, p. 171-175, 1967.

REN, Ai-T. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungus alters root-sourced signal (abscisic acid) for better drought acclimation in *Zea mays* L. seedlings. **Environmental and experimental botany**, v. 167, p. 103824, 2019.

SALES, F. R. *et al.* Native Arbuscular Mycorrhizal Fungi Exhibit Biotechnological Potential in Improvement of Soil Biochemical Quality and Increasing Yield in Sugarcane Cultivars. **Sugar Tech**, v. 23, p. 1235–1246, 2021.

SANTOS, G. O. *et al.* Disponibilidade hídrica e as anomalias climáticas no cultivo de soja e milho no Cerrado. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 10, n. 3, p. 214-222, 2022.

SANTOS, J. A. *et al.* Vantagens fisiológicas e nutricionais às plantas de milho inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 1, n. 1, 2023.

SELVAKUMAR, G. *et al.* Propagation technique of arbuscular mycorrhizal fungi isolated from coastal reclamation land. **European Journal of Soil Biology**, v. 74, p. 39-44, 2016.

SHERIN, G; ASWATHI, K.P. R; PUTHUR, J. T. Photosynthetic functions in plants subjected to stresses are positively influenced by priming. **Plant Stress**, v. 4, p. 100079, 2022.

SILVA, D. F. da. *et al.* Características morfológicas, melhoramento genético e densidade de plantio das culturas do sorgo e do milho: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, e12310313172, 2021.

SINGH, H; KUMAR, D; SONI, V. Performance of chlorophyll a fluorescence parameter in *Lemna minor* under heavy metal stress induced by various concentration of copper. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 10620, 2022.

SITKO, K. *et al.* Influência da privação de macronutrientes a curto prazo no milho nas características fotossintéticas, transpiração e teor de pigmentos. **Relatórios científicos**, v. 9: p. 1-12, 2019.

SOUSA, C. S. *et al.* Glomalin: characteristics, production, limitations and contribution to soils. **Ciências Agrárias**, v. 33, p. 3033-3044, 2012.

SRIVASTAVA, S; JOHNY, L; ADHOLEYA, A. Review of patents for agricultural use of arbuscular mycorrhizal fungi. **Mycorrhiza**, v. 31, p. 127-136, 2021.

- STRASSER, R. J; SRIVASTAVA, A; TSIMILLI-MICHAEL, M. The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. **Probing photosynthesis: mechanisms, regulation and adaptation**, v. 25, p. 445-483, 2000.
- STÜRMER, Sidney L.; BEVER, James D.; MORTON, Joseph B. Biogeography of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota): a phylogenetic perspective on species distribution patterns. **Mycorrhiza**, v. 28, n. 7, p. 587-603, 2018.
- TARDIEU, F; GRANIER, C; MULLER, B. Modelling leaf expansion in a fluctuating environment: are changes in specific leaf area a consequence of changes in expansion rate?. **New phytologist**, v. 143, n. 1, p. 33-43, 1999.
- TEDERSOO, L. *et al.* High-level classification of the fungi and a tool for evolutionary ecological analyses. **Springer**, v. 90, p. 135–159, 2018.
- TIAN, H. *et al.* Spatio-temporal dynamics of an indigenous arbuscular mycorrhizal fungal community in an intensively managed maize agroecosystem in North China. **Applied Soil Ecology**, v. 47, n. 3, p. 141-152, 2011.
- USDA, United States Department of Agriculture. Grain: **World Markets and Commerce**. 2022.
- VARGAS, L.; PEIXOTO, C. M.; ROMAN, E. S. Manejo de plantas daninhas na cultura demilho. Embrapa Trigo. Documento online 61. Set., 2006.
- VERMA, K. K. *et al.* Foliar application of silicon boost growth, photosynthetic leaf gas exchange, antioxidative response and resistance to limited water irrigation in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 166, p. 582–592, 2021.
- WANG, S. *et al.* Functional analysis of the Os NPF4.5 nitrate transporter reveals a conserved mycorrhizal pathway of nitrogen acquisition in plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 117, n. 28, p. 16649–16659, 2020.
- WANG, X. *et al.* Mapping of Phenological Traits in Northeast China Maize (*Zea mays* L.). **Agronomy**, v. 12, n. 10, p. 2585, 2022.
- WANG, Z. *et al.* Effects of drought stress on photosynthesis and photosynthetic electron transport chain in young apple tree leaves. **Biology open**, v. 7, n. 11, p. bio035279, 2018.
- XU, H; LU, Y; TONG, S. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of maize seedlings under salt stress. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, p. 199-204, 2018.
- YAN, Q. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi improve the growth and drought tolerance of *Cinnamomum migao* by enhancing physio-biochemical responses. **Ecology and Evolution**, v. 12, n. 7, p. e9091, 2022.

YE, Q; WANG, H; LI, H. Arbuscular mycorrhizal fungi improve growth, photosynthetic activity, and chlorophyll fluorescence of vitis vinifera l. cv. ecolly under drought stress. **Agronomy**, v. 12, n. 7, p. 1563, 2022.

YOOYONGWECH, S. *et al.* Influence of different encapsulation types of arbuscular mycorrhizal fungi on physiological adaptation and growth promotion of maize (*Zea mays* L.) subjected to water deficit. **Not Bot Horti Agrobo**, v. 47, n. 1, p. 213-220, 2018.

YOUSAF, Muhammad Irfan *et al.* Characterization of maize (*Zea Mays* L.) hybrids for physiological attributes and grain quality traits under heat stress. *Iranian Journal of Plant Physiology*, v. 12, n. 2, p. 4075-4087, 2022.

ZHANG, R. *et al.* Comprehensive utilization of corn starch processing by-products: A review. **Grain & Oil Science and Technology**, v. 4, n. 3, p. 89-107, 2021.

ZHAO, W. *et al.* Effects of water stress on photosynthesis, yield, and water use efficiency in winter wheat. **Water**, v. 12, n. 8, p. 2127, 2020.

ZHU, Xian-Can *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on photosynthesis and water status of maize under high temperature stress. *Plant and soil*, v. 346, p. 189-199, 2011.

ZOU, Y.-N.; WU, Q.-S.; KUČA, K. Unravelling the role of arbuscular mycorrhizal fungi in mitigating the oxidative burst of plants under drought stress. **Plant Biology**, v. 23, p. 50-57, 2021.



APÊNDICES

APÊNDICE A – DADOS CLIMÁTICOS DURANTE O DÉFICIT HÍDRICO

Tabela 1 – Dados climáticos durante o déficit hídrico no período da manhã (8:00 às 10:00 h) e tarde (12:00 às 14:00 h). TEMP: Temperatura (°C); UR: Umidade relativa (%); DPV: Déficit de pressão de vapor (kPa); RFA: radiação fotossinteticamente ativa ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

1 DADH (14/nov)									
Horário	TEMP	UR	DPV	RFA	Horário	TEMP	UR	DPV	RFA
08:00	30.2	75	1.38	376	12:00	38.3	53	2.19	1089
08:15	31.0	72	1.57	515	12:15	37.7	52	2.14	891
08:30	31.7	69	1.75	1195	12:30	37.2	54	2.31	725
08:45	32.2	67	1.72	344	12:45	36.8	53	2.26	652
09:00	31.8	66	1.66	378	13:00	36.3	56	2.24	481
09:15	33.5	64	1.72	459	13:15	37.5	53	2.32	679
09:30	34.0	61	1.74	601	13:30	37.7	52	2.42	1268
09:45	35.0	58	1.80	623	13:45	37.0	52	2.38	1410
10:00	35.2	57	1.78	1297	14:00	36.9	52	2.75	486
2 DADH (15/nov)									
Horário	TEMP	UR	DPV	RFA	Horário	TEMP	UR	DPV	RFA
08:00	31.7	70	1.32	378	12:00	37.0	54	3.15	2035
08:15	31.2	69	1.51	799	12:15	37.0	53	3.29	2038
08:30	31.1	68	1.62	395	12:30	38.0	53	3.24	1906
08:45	31.7	69	1.71	1385	12:45	38.3	53	3.46	1957
09:00	32.6	65	2.00	378	13:00	38.8	51	3.44	2116
09:15	31.8	65	1.76	376	13:15	38.8	49	3.31	909
09:30	31.7	66	1.82	857	13:30	38.4	49	3.25	464
09:45	32.7	65	1.92	474	13:45	37.8	48	2.84	425
10:00	34.6	63	1.88	1028	14:00	37.4	46	2.88	1160
3 DADH (16/nov)									
Horário	TEMP	UR	DPV	RFA	Horário	TEMP	UR	DPV	RFA
08:00	30.9	68	1.30	540	12:00	38.8	49	2.85	2040
08:15	31.1	66	1.42	923	12:15	38.3	50	3.02	1688
08:30	31.0	66	1.55	1165	12:30	37.8	50	3.02	486
08:45	31.7	66	1.54	1253	12:45	37.9	50	3.16	2030
09:00	31.8	64	1.66	828	13:00	38.3	50	3.28	522
09:15	32.2	63	1.69	642	13:15	39.2	48	2.70	830
09:30	32.6	62	1.69	691	13:30	38.0	49	2.75	1038
09:45	34.7	58	1.83	1392	13:45	37.9	49	2.76	1405
10:00	35.0	55	1.94	664	14:00	37.8	50	2.87	1248
4 DADH (17/nov)									
Horário	TEMP	UR	DPV	RFA	Horário	TEMP	UR	DPV	RFA
08:00	32.3	66	1.53	906	12:00	36.4	51	2.21	2079
08:15	33.3	64	1.61	635	12:15	37.0	50	2.42	618
08:30	32.5	63	1.78	1160	12:30	37.3	49	2.68	469
08:45	32.4	63	2.02	564	12:45	38.0	47	2.87	452

09:00	33.2	62	1.88	948	13:00	37.5	44	2.58	329
09:15	33.5	59	1.99	606	13:15	36.3	47	2.38	1739
09:30	33.5	58	2.06	532	13:30	37.2	47	2.68	1322
09:45	34.1	59	1.95	1500	13:45	37.4	47	2.64	461
10:00	34.6	56	2.14	1659	14:00	37.2	48	2.32	1380

5 DADH (18/nov)

Horário	TEMP	UR	DPV	RFA	Horário	TEMP	UR	DPV	RFA
08:00	32.2	67	1.20	891	12:00	37.8	50	2.38	804
08:15	32.0	66	1.43	281	12:15	36.9	50	2.41	620
08:30	32.0	65	1.35	879	12:30	36.2	52	2.47	2067
08:45	33.9	63	1.42	503	12:45	35.8	54	2.71	2025
09:00	33.6	62	1.44	562	13:00	35.7	56	2.69	601
09:15	33.8	63	1.47	645	13:15	35.6	56	2.33	1776
09:30	33.6	63	1.62	347	13:30	35.4	55	2.34	591
09:45	34.0	62	1.65	391	13:45	34.7	57	2.59	1268
10:00	33.8	60	1.64	1781	14:00	34.9	56	2.73	782

*DADH: Dias após o déficit hídrico.

APÊNDICE B – TABELAS DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS

Tabela 1 – Dados de Altura e diâmetro com suas respectivas comparações de médias.

Tratamento	25 DAP	32 DAP	36 DAP	40 DAP	46 DAP	48 DAP	50 DAP	51 DAP
	Altura (cm)							
DH_ESTÉRIL	18.25 ns	23.40 ns	29.37 ns	32.67 ns	42.12 ns	45.37 ns	43.75 ns	43.87 ab
DH_NAT	13.37 ns	20.00 ns	26.62 ns	31.57 ns	39.87 ns	42.75 ns	42.45 ns	42.62 b
DH_RIZHO	19.32 ns	23.02 ns	30.37 ns	35.60 ns	45.70 ns	46.62 ns	46.45 ns	46.87 ab
DH_NAT+RIZHO	17.62 ns	25.35 ns	29.50 ns	36.57 ns	47.70 ns	48.12 ns	48.95 ns	49.05 ab
IR_ESTÉRIL	16.75 ns	21.67 ns	27.25 ns	32.57 ns	41.80 ns	44.12 ns	49.15 ns	50.25 ab
IR_NAT	13.50 ns	20.62 ns	27.87 ns	32.75 ns	41.67 ns	45.67 ns	48.40 ns	49.25 ab
IR_RIZHO	18.25 ns	24.30 ns	25.85 ns	33.42 ns	42.57 ns	46.87 ns	50.40 ns	51.25 ab
IR_NAT+RIZHO	16.42 ns	23.40 ns	31.12 ns	35.00 ns	46.50 ns	51.75 ns	54.80 ns	55.87 a
	Diâmetro (mm)							
DH_ESTÉRIL	8.97 a	13.10 ns	15.85 ns	18.60 b	21.40 a	19.37 cd	19.07 bc	16.40 d
DH_NAT	6.52 a	10.87 ns	15.40 ns	19.40 ab	24.20 a	21.40 bcd	21.82 ab	20.35 bc
DH_RIZHO	8.47 a	12.37 ns	15.65 ns	18.22 b	20.85 a	18.42 d	17.55 c	15.87 d
DH_NAT+RIZHO	8.12 a	14.27 ns	18.30 ns	21.17 ab	23.80 a	22.52 abc	22.17 ab	19.75 cd
IR_ESTÉRIL	9.07 a	13.62 ns	17.12 ns	18.60 ab	21.55 a	21.77 abc	21.95 ab	21.95 abc
IR_NAT	6.55 a	11.92 ns	16.05 ns	20.50 ab	24.02 a	24.40 ab	24.0 a	24.25 ab
IR_RIZHO	9.62 a	14.75 ns	17.80 ns	19.90 ab	21.95 a	22.15 abc	22.37 ab	22.37 abc
IR_NAT+RIZHO	7.15 a	14.40 ns	19.40 ns	22.05 a	24.25 a	24.75 a	25.00 a	25.12 a

DAP: Dias após o plantio, IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%).

Tabela 2 -Dados de Área foliar com suas respectivas comparações de médias.

Tratamento	36 DAP	40 DAP	46 DAP	48 DAP	50 DAP	51 DAP
DH_ESTÉRIL	367.00 ns	385.50 ns	439.25 a	439.25 a	455.25 d	431.25 c
DH_NAT	299.50 ns	356.75 ns	474.25 a	474.25 a	625.50 abc	526.25 bc
DH_RIZHO	380.50 ns	428.00 ns	443.00 a	443.00 a	528.75 cd	501.50 bc
DH_NAT+RIZHO	383.75 ns	435.00 ns	499.00 a	499.00 a	585.50 abc	560.75 b
IR_ESTÉRIL	332.50 ns	391.75 ns	434.25 a	434.25 a	541.75 bcd	551.50 b
IR_NAT	325.00 ns	398.00 ns	509.50 a	509.50 a	638.50 ab	607.25 ab
IR_RIZHO	365.50 ns	410.75 ns	448.75 a	448.75 a	604.50 abc	572.31 b
IR_NAT+RIZHO	396.25 ns	453.00 ns	563.50 a	563.50 a	682.00 a	712.25 a

DAP: Dias após o plantio, IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%).

Tabela 3 – Dados de Massa fresca de folha e colmo; Massa seca de folha, colmo e raiz e número de folhas, e Conteúdo relativo de água (CRA) e Massa Foliar Específica (MFE) com suas respectivas comparações de médias.

Tratamento	Folha	Colmo	Folha	Colmo	Raiz
	g MF ⁻¹		g MS ⁻¹		
DH_ESTÉRIL	42.50 c	63.25 c	13.75 d	12.5 d	13.75 b
DH_NAT	53.75 c	82.50 c	17.50 bcd	18.75 bcd	11.25 b
DH_RIZHO	47.50 c	72.50 c	16.25 cd	15.00 cd	20 ab
DH_NAT+RIZHO	58.75 c	102.50 c	20.00 bc	25.00 bc	17.50 b
IR_ESTÉRIL	93.75 b	151.25 b	22.50 b	23.75 bc	17.50 b
IR_NAT	116.25 a	167.5 b	22.50 b	26.25 b	21.25 ab
IR_RIZHO	93.75 b	148.75 b	20 bc	22.5 bcd	22.5 ab
IR_NAT+RIZHO	130.0 a	215.00 a	28.75 a	38.75 a	30.00 a
Tratamento	Nº Folha		CRA (%)	MFE (kg m ⁻²)	
DH_ESTÉRIL	5.50 ns		51.16 b	0.0161 c	
DH_NAT	5.25 ns		45.86 b	0.0158 c	
DH_RIZHO	6.25 ns		53.26 b	0.0159 c	
DH_NAT+RIZHO	6.25 ns		56.06 b	0.0167 bc	
IR_ESTÉRIL	5.75 ns		81.64 a	0.0195 a	
IR_NAT	5.75 ns		89.63 a	0.0188 ab	
IR_RIZHO	6.00 ns		87.16 a	0.0200 a	
IR_NAT+RIZHO	5.75 ns		87.87 a	0.0191 a	

IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%).

Tabela – Dados da água da parte aérea (APA) com suas respectivas comparações de médias.

Tratamentos	APA (g H ₂ O)
DH_ESTÉRIL	79.5 c
DH_NAT	100.0 c
DH_RIZHO	88.75 c
DH_NAT+RIZHO	116.25 c
IR_ESTÉRIL	198.75 b
IR_NAT	235.0 ab
IR_RIZHO	200.0 b
IR_NAT+RIZHO	277.5 a

IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%).

Tabela – Dados dos pigmentos fotossintéticos e suas respectivas comparações de médias.

Tratamento	Clorofila a	Clorofila b	carotenoide	Clorofila total
DH_ESTÉRIL	0.351 ns	0.200 ns	0.514 c	1.066 ns
DH_NAT	0.378 ns	0.227 ns	0.579 bc	1.185 ns
DH_RIZHO	0.390 ns	0.237ns	0.611 bc	1.239 ns
DH_NAT+RIZHO	0.384ns	0.227ns	0.588bc	1.200 ns
IR_ESTÉRIL	0.374ns	0.243 ns	0.654 bc	1.273 ns
IR_NAT	0.428ns	0.300ns	0.818 a	1.548 ns
IR_RIZHO	0.403 ns	0.264 ns	0.717 ab	1.385 ns
IR_NAT+RIZHO	0.374 ns	0.230ns	0.624 bc	1.228 ns

IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhologlomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%).

Tabela – Dados de carboidrato e prolina e suas respectivas comparações de médias.

Tratamento	Carboidratos	Prolina
DH_ESTÉRIL	228.37 bc	7.99 c
DH_NAT	228.35 bc	12.49 a
DH_RIZHO	189.44 c	10.37 b
DH_NAT+RIZHO	231.54 bc	8.22 c
IR_ESTÉRIL	354.08 abc	3.04 d
IR_NAT	412.52 ab	3.19 d
IR_RIZHO	405.63 ab	3.33 d

IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhologlomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%).

Tabela – Dados do índice de intensidade de verde com suas respectivas comparações de médias.

Tratamento	Índice de Intensidade de Verde				
	1 DADH	2 DADH	3 DADH Manhã	4 DADH	5 DADH
DH_ESTÉRIL	42.30 ns	41.57 ns	38.27 ns	37.17 b	39.47 ns
DH_NAT	41.62 ns	40.72 ns	38.40 ns	40.07 ab	41.20 ns
DH_RIZHO	43.82 ns	40.62 ns	39.00 ns	38.12 ab	37.52 ns
DH_NAT+RIZHO	42.42 ns	41.75 ns	39.40 ns	39.35 ab	38.37 ns
IR_ESTÉRIL	43.47 ns	43.95 ns	42.95 ns	41.82 ab	41.30 ns
IR_NAT	45.05 ns	44.85 ns	43.87 ns	44.45 a	43.50 ns
IR_RIZHO	40.45 ns	39.60 ns	41.10 ns	41.42 ab	39.77 ns
IR_NAT+RIZHO	44.27 ns	43.85 ns	42.77 ns	42.02 ab	40.25 ns
	Tarde				
DH_ESTÉRIL	40.27 ns	38.90 ns	38.90 ns	37.95 ns	38.92 ns
DH_NAT	43.22 ns	41.47 ns	42.10 ns	39.87 ns	40.90 ns
DH_RIZHO	41.00 ns	39.60 ns	38.60 ns	38.90 ns	41.27 ns
DH_NAT+RIZHO	42.60 ns	39.75 ns	40.30 ns	38.77 ns	39.00 ns
IR_ESTÉRIL	42.47 ns	41.50 ns	41.72 ns	41.75 ns	39.85 ns
IR_NAT	44.37 ns	44.02 ns	43.12 ns	43.70 ns	45.50 ns
IR_RIZHO	40.20 ns	40.07 ns	41.22 ns	39.75 ns	39.35 ns
IR_NAT+RIZHO	43.95 ns	42.70 ns	41.57 ns	41.40 ns	41.30 ns

DADH: Dias após o déficit hídrico, IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhologlomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%).

TABELA – Dados de Fv/F0 com suas respectivas comparações de médias.

Tratamento	Índice de Intensidade de Verde				
	1 DADH	2 DADH	3 DADH Manhã	4 DADH	5 DADH
DH_ESTÉRIL	3.77ns	3.71 ns	1.30 ab	3.06 ns	3.37 ns
DH_NAT	3.48 ns	3.39 ns	2.07 ab	2.91 ns	2.86 ns
DH_RIZHO	3.68 ns	3.27 ns	0.90 b	2.62 ns	2.80 ns
DH_NAT+RIZHO	3.85 ns	3.27 ns	1.32 ab	3.16 ns	3.18 ns
IR_ESTÉRIL	3.83 ns	2.52 ns	1.36 ab	3.40 ns	3.62 ns
IR_NAT	4.05 ns	3.74 ns	1.57 ab	3.26 ns	3.61 ns
IR_RIZHO	3.82 ns	3.76 ns	1.82 ab	3.15 ns	3.03 ns
IR_NAT+RIZHO	3.68 ns	2.83 ns	2.36 a	3.41 ns	3.18 ns
	Tarde				
DH_ESTÉRIL	1.22 ns	2.00 ns	0.59 ab	1.61 ns	2.03 ab
DH_NAT	1.74 ns	1.92 ns	0.59 ab	0.84 ns	2.13 ab
DH_RIZHO	1.30 ns	1.70 ns	0.92 ab	1.73 ns	1.99 b
DH_NAT+RIZHO	1.55 ns	0.96 ns	0.54 ab	1.38 ns	1.69 ab
IR_ESTÉRIL	1.66 ns	2.07 ns	0.71 b	1.63 ns	2.13 ab



IR_NAT	2.14 ns	2.21 ns	1.61 ab	2.18 ns	2.70 a
IR_RIZHO	1.98 ns	2.64 ns	1.61 a	2.16 ns	2.56 a
IR_NAT+RIZHO	2.01 ns	2.82 ns	1.61 ab	2.08 ns	2.40 ab

DADH: Dias após o déficit hídrico, IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey (5%).

TABELA – Dados de Fv/Fm com suas respectivas comparações de médias.

Tratamento	1 DADH	2 DADH	3 DADH			4 DADH	5 DADH
			Manhã				
DH_ESTÉRIL	0,78 ns	0,78 ns	0,38 ab	0,73 ns	0,75 ns		
DH_NAT	0,78 ns	0,75 ns	0,50 a	0,72 ns	0,72 ns		
DH_RIZHO	0,79 ns	0,78 ns	0,24 b	0,75 ns	0,76 ns		
DH_NAT+RIZHO	0,79 ns	0,77 ns	0,47 ab	0,76 ns	0,76 ns		
IR_ESTÉRIL	0,80 ns	0,76 ns	0,34 ab	0,78 ns	0,79 ns		
IR_NAT	0,80 ns	0,80 ns	0,36 ab	0,77 ns	0,79 ns		
IR_RIZHO	0,80 ns	0,79 ns	0,39 ab	0,77 ns	0,73 ns		
IR_NAT+RIZHO	0,79 ns	0,76 ns	0,51 a	0,77 ns	0,76 ns		
			Tarde				
DH_ESTÉRIL	0,49 ns	0,68 bc	0,25 b	0,49 ab	0,66 a		
DH_NAT	0,54 ns	0,67 c	0,43 ab	0,27 b	0,62 a		
DH_RIZHO	0,57 ns	0,73 abc	0,072 a	0,65 a	0,65 a		
DH_NAT+RIZHO	0,62 ns	0,73 ab	0,66 a	0,71 a	0,63 a		
IR_ESTÉRIL	0,65 ns	0,75 a	0,45 ab	0,62 a	0,68 a		
IR_NAT	0,68 ns	0,77 a	0,61 a	0,71 a	0,73 a		
IR_RIZHO	0,67 ns	0,75 a	0,63 a	0,70 a	0,71 a		
IR_NAT+RIZHO	0,68 ns	0,73 a	0,59 ab	0,70 a	0,71 a		

DADH: Dias após o déficit hídrico IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%).

TABELA – Dados de Pi_{ABS} com suas respectivas comparações de médias.

Tratamento	1 DADH	2 DADH	3 DADH			4 DADH	5 DADH
			Manhã				
DH_ESTÉRIL	3.121 ns	2.509 ns	2.073 ab	1.604 ns	1.220 b		
DH_NAT	2.801 ns	2.141 ns	2.864 ab	1.513 ns	1.340 b		
DH_RIZHO	2.995 ns	2.083 ns	1.858 ab	1.242 ns	1.163 b		
DH_NAT+RIZHO	2.99 2ns	2.081 ns	0.878 b	1.557 ns	1.376 b		
IR_ESTÉRIL	3.464 ns	1.135 ns	3.071 a	2.334 ns	2.669 a		
IR_NAT	3.871 ns	3.220 ns	3.552 a	2.283 ns	2.678 a		
IR_RIZHO	3.302 ns	2.636 ns	3.214 a	2.093 ns	2.626 a		
IR_NAT+RIZHO	3.248 ns	1.470 ns	3.099 a	2.184 ns	1.979 ab		
			Tarde				
DH_ESTÉRIL	0.320 c	0.002 ns	0.259 bc	0.522 ns	0.435 cd		
DH_NAT	1.736 a	0.189 ns	0.0745 bc	0.198 ns	0.446 cd		
DH_RIZHO	0.334 c	0.021 ns	0.119 bc	0.457 ns	0.339 d		
DH_NAT+RIZHO	0.499 bc	0.028 ns	0.036 c	0.279 ns	0.330 d		
IR_ESTÉRIL	0.634 bc	0.158 ns	0.118 b	0.513 ns	0.984 bc		
IR_NAT	1.217 ab	0.328 ns	0.372 ab	1.094 ns	1.680 a		
IR_RIZHO	0.931 bc	0.417 ns	0.675 a	0.986 ns	1.275 ab		
IR_NAT+RIZHO	1.012 abc	0.561 ns	0.235 bc	0.984 ns	1.139 ab		

DADH: Dias após o déficit hídrico, IR: irrigados, DH: déficit hídrico, NAT: solo natural e RIZHO: *Rizhoglomus clarum*. Médias seguidas pelas mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo de teste Tukey (5%).

APÊNDICES C – TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Quadro da análise de variância			
Variáveis/dias de avaliações	Tratamento	Bloco	CV
Manhã			
Fv/Fm-1 DADH	0.50510	0,57255	1,85 %
Fv/Fm-2 DADH	0.07557	0.43601	2,52 %
Fv/Fm-3 DADH	0.01597	0.67750	19,79 %
Fv/Fm-4 DADH	0.059984	0.303258	2,96 %
Fv/Fm-5 DADH	0.11018	0.55877	3,63 %
Tarde			
Fv/Fm-1 DADH	0.07813	0.77862	13,24 %
Fv/Fm-2 DADH	0.00055	0.84176	2,9 %
Fv/Fm-3 DADH	0.00636	0.76579	22,53 %
Fv/Fm-4 DADH	0.00304	0.31819	18,62 %
Fv/Fm-5 DADH	0.03760	0.86922	5,77 %

Quadro da análise de variância			
Variáveis/dias de avaliações	Tratamento	bloco	CV
Manhã			
Fv/F0-1 DADH	0.94389	0.82798	15.74 %
Fv/F0-2 DADH	0.31581	0.86297	24.12 %
Fv/F0-3 DADH	0.01116	0.42478	31.48 %
Fv/F0-4 DADH	0.70000	0.42849	20.77 %
Fv/F0-5 DADH	0.56408	0.96845	21.05 %
Tarde			
Fv/F0-1 DADH	0.28210	0.33779	33.82 %
Fv/F0-2 DADH	0.05762	0.55257	36.24 %
Fv/F0-3 DADH	0.009936	0.135648	47.28 %
Fv/F0-4 DADH	0.29792	0.22682	46.62 %
Fv/F0-5 DADH	0.01010	0.63696	15.71 %

Quadro da análise de variância			
Variáveis/dias de avaliações	Tratamento	bloco	CV
Manhã			
PI _{ABS} -1 DADH	0.92150	0.78448	35.02 %
PI _{ABS} -2 DADH	0.14695	0.57282	45.67 %
PI _{ABS} -3 DADH	0.00326	0.54864	32.68 %
PI _{ABS} -4 DADH	0.38687	0.58030	42.61 %
PI _{ABS} -5 DADH	0.00018	0.50740	27.14 %
Tarde			
PI _{ABS} -1 DADH	0.000038	0.234233	38.84 %
PI _{ABS} -2 DADH	0.084477	0.301779	132.19 %
PI _{ABS} -3 DADH	0.00028	0.57860	74.29 %
PI _{ABS} -4 DADH	0.12849	0.10976	80.38 %

PIABS-5 DADH	0.000000	0.065847	29.03 %
---------------------	----------	----------	---------

Quadro da análise de variância			
Variáveis/dia de avaliação	Tratamento	bloco	CV
Manhã			
SPAD-1 DADH	0.71826	0.66176	8.78 %
SPAD-2 DADH	0.47598	0.70010	9.06 %
SPAD-3 DADH	0.26256	0.80122	9.38 %
SPAD-4 DADH	0.04383	0.57912	7.22 %
SPAD-5 DADH	0.47448	0.35430	9.39 %
Tarde			
SPAD-1 DADH	0.52574	0.74890	8.05 %
SPAD-2 DADH	0.37161	0.61502	7.94 %
SPAD-3 DADH	0.35077	0.48130	7.03 %
SPAD-4 DADH	0.20741	0.47729	7.58 %
SPAD-5 DADH	0.33285	0.91478	9.52 %

DADH: Dias após o déficit hídrico

Quadro da análise de variância			
Análise de crescimento (g/planta)	Tratamento	bloco	CV
MFF	0.00000000	0.00033819	9.5 %
MFC	0.000000	0.028384	14.92 %
MSF	0.000001	0.062399	12.29 %
MSC	0.00000577	0.00138622	20.78 %
MSR	0.0007174	0.0247532	24.69 %
CRA	0.0000	0.4934	7.01 %
APA	0.000000	0.017849	12.12 %

Quadro da análise de variância			
Taxa de crescimento em altura (cm/dia)	Tratamento	bloco	CV
25 DAP	0.088935	0.006534	18.2 %
32 DAP	0.147962	0.000369	12 %
36 DAP	0.56224	0.00667	14.32 %
40 DAP	0.265373	0.002136	8.81 %
46 DAP	0.093566	0.107850	8.85 %
48 DAP	0.33599	0.05341	10.63 %
50 DAP	0.062637	0.136836	10.58 %
51 DAP	0.041773	0.192438	10.73 %

Quadro da análise de variância			
Diâmetro do colmo (mm/dia)	Tratamento	bloco	CV
25 DAP	0,0288578	0,0098384	17,47 %
32 DAP	0,147962	0,000883	15,42 %
36 DAP	0,126120	0,000651	12,5 %
40 DAP	0,0070014	0,0000098	6,48 %
46 DAP	0,032231	0,314224	7,6 %

48 DAP	0,00002	0,73734	6,34 %
50 DAP	0,000014	0,225050	6,93 %
51 DAP	0,00000	0,14855	7,96 %

Quadro da análise de variância

Área Folar (Cm ²)	Tratamento	bloco	CV
D 36AP	0.163349	0.000715	14.47 %
D 40AP	0.285279	0.000173	10.65 %
D 46AP	0.036389	0.008566	11.51 %
D 48AP	0.071187	0.101729	13.37 %
D 50AP	0.00002	0.83395	7.93 %
D 51AP	0.0000131	0.0226647	9.07 %

DAP: Dias após o plantio

QUADRO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA

PIGMENTO FOTOSSINTÉTICOS	TRATAMENTO	BLOCO	CV
CLOROFILA A	0.57345	0.14202	11.27 %
CLOROFILA B	0.05167	0.43054	12.95 %
CAROTENOIDE	0.03101	0.55089	14.23 %
CLOROFILA TOTAL	0.08108	0.37996	12.89 %
CARBOIDRATO	0.00141	0.56356	29.05 %
PROLINA	0.000000	0.093375	8.35 %



Emitido em 29/01/2026

DOCUMENTOS COMPROBATÓRIOS Nº 134/2026 - DPARQ (11.14.68.07.05)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 29/01/2026 15:09)

CRISTIANE DE JESUS PEREIRA GASPAR

SECRETARIO(A)

866500

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sis.sig.uema.br/documentos/> informando seu número:
134, ano: **2026**, tipo: **DOCUMENTOS COMPROBATÓRIOS**, data de emissão: **29/01/2026** e o código de
verificação: **af5f9f11c6**

