

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, NATURAIS E TECNOLÓGICAS**

**DANIEL LOPES COSTA**

**CARACTERIZAÇÃO ANATÔMICA RADICULAR  
DE *Zea mays* L. INOCULADAS COM FUNGOS MICORRÍZICOS  
ARBUSCULARES SOB DIFERENTES CONDIÇÕES HÍDRICAS**

**IMPERATRIZ, MA  
2025**

**DANIEL LOPES COSTA**

**CARACTERIZAÇÃO ANATÔMICA RADICULAR  
DE *Zea mays* L. INOCULADAS COM FUNGOS MICORRÍZICOS  
ARBUSCULARES SOB DIFERENTES CONDIÇÕES HÍDRICAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnológicas da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão - UEMASUL, como requisito para obtenção de título de Licenciatura em Ciências Biológicas.

Orientadora: Profa. Dra. Niara Porto de Carvalho.

**IMPERATRIZ, MA  
2025**



C838c

Costa, Daniel Lopes

Caracterização anatômica radicular de *Zea mays* L. inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares sob diferentes condições hídricas. / Daniel Lopes Costa. – Imperatriz, MA, 2025.

37 f.; il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Ciências Biológicas) – Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, Imperatriz, MA, 2025.

1. Anatomia vegetal. 2. Milho (*Zea mays* L.). 3. Fungos Micorrizicos. 4. Imperatriz - MA. I. Título.

CDU 581.1

**DANIEL LOPES COSTA**

**CARACTERIZAÇÃO ANATÔMICA RADICULAR  
DE *Zea mays* L. INOCULADAS COM FUNGOS MICORRÍZICOS  
ARBUSCULARES SOB DIFERENTES CONDIÇÕES HÍDRICAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnológicas da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão - UEMASUL, como requisito para obtenção de título de Licenciatura em Ciências Biológicas.

Aprovado em: 30 / 01 / 2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Profa. Dra. Niara Moura Porto**  
Doutora em Produtos Naturais e Sintéticos Bioativos  
(Orientadora)

---

**Profa. Dra. Rafaela Carvalho Tigre**  
Doutora em Biologia Vegetal  
(Membro)

---

**Prof. Me. Silvio Cortez Silva**  
Mestre em Produção Vegetal  
(Membro)

## AGRADECIMENTOS

Completar esta jornada foi uma tarefa desafiadora e gratificante, e eu não poderia ter feito isso sem o apoio de muitas pessoas essenciais. Este trabalho é um reflexo do esforço coletivo daqueles que estiveram ao meu lado durante todo esse tempo de graduação.

Primeiramente, agradeço a Deus por me dar forças, saúde, proteção e discernimento para seguir adiante mesmo nos momentos mais difíceis. Sem Sua graça e direção, eu não teria chegado até aqui.

Aos meus pais, Antônia Clemildes Lopes Costa e Eraldo dos Santos Costa e minha irmã, Elizabeth Maria Lopes Costa, agradeço profundamente pelo amor incondicional, pelo apoio emocional e por confiarem em mim. Vocês são o meu alicerce, meus maiores incentivadores, e sempre me mostraram a importância da dedicação e do amor ao próximo.

À minha namorada, Íris Figueredo Alves meu agradecimento especial pelo amor, pela ajuda nos projetos e pela compreensão e paciência durante este período. Seu apoio emocional e incentivo são essenciais para manter minha motivação e seguir em frente. Você sempre acredita em mim e me dá forças para continuar com os projetos e ideias da minha vida.

À minha orientadora, Dra. Niara Porto, pelo grande incentivo durante toda a graduação, por abrir as portas para mim dentro da pesquisa e das demais oportunidades dentro da universidade, pelos conselhos, conversas, viagens e orientações durante todos esses anos. Sou eternamente grato por tudo que fizeste por mim, seu carinho e companheirismo foram essenciais para completar esta jornada, sinto-me feliz e honrado por ter sido seu orientando.

À minha amiga Lívia Chagas Santana, que durante cinco anos esteve ao meu lado, compartilhando de diversos momentos felizes e grandes aprendizados.

Aos meus amigos João Henrique, Arabutan e Nailthon, pela amizade, obrigado pelo apoio e por trazerem alegria nos momentos mais estressantes. A companhia de vocês, as conversas e as risadas me ajudaram a manter a sanidade e a perspectiva durante o processo.

A todos os meus colegas do laboratório de Microscopia e Botânica Aplicada, pelo apoio em projetos e pelas boas prosas e os bons momentos vivenciados.

A todos os professores pelo comprometimento com meu aprendizado que foi crucial para o sucesso deste trabalho. Cada conselho e cada crítica construtiva me ajudaram a crescer academicamente e como pessoa.

À Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão pela oportunidade de realização da graduação

## RESUMO

Dentre as principais culturas produzidas pela agricultura brasileira, destaca-se o milho (*Zea mays* L.). O milho é um dos cereais mais consumidos no mundo sendo importante para suprir as necessidades nutricionais humana e animal, pertencente à família Poaceae, com origem nas américas, a qual o cultivo se dá há pelo menos cinco mil anos, pois possui grande valor nutritivo e potencial produtivo. Nesse cenário, destaca-se o uso de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) que fazem simbiose com o vegetal, onde há uma interação benéfica, pois, a planta transfere o carbono produzido através da fotossíntese para os FMA que por meio de sua rede de hifas, absorvem e transferem para a planta a água e nutrientes. O trabalho teve como objetivo realizar a caracterização radicular da variedade de milho híbrido (*Zea mays* L.), inoculada com fungos micorrízicos do gênero *Glomus*. e expostas ao estresse hídrico. O experimento foi conduzido na cidade de Imperatriz, nas estações do Centro de Difusão Tecnológica, o plantio foi realizado em vasos dispostos em casa de vegetação, com delineamento experimental utilizado em blocos casualizados com 4 tratamentos T1 (submetido a 40% da ETc sem FMA); T2 (submetido a 40% da ETc + FMA); T3 (submetido a 100% da ETc sem FMA) e T4 (submetido a 100% da ETc + FMA), ambos com 5 repetições. As secções transversais foram realizadas à mão livre, com auxílio de uma lâmina cortante, posteriormente foram clarificadas com hipoclorito de sódio, neutralizado com ácido acético (0,2%), lavadas com água destilada e coradas com uma solução de azul de astra e safranina. Os tratamentos T1, T2 e T3 apresentaram menor espessura da epiderme e endoderme quando comparados a T4. Nos tratamentos T4 e T2, houve um aumento significativo na espessura do floema quando comparados aos demais tratamentos. Foi verificada uma redução na espessura do xilema nos tratamentos com a presença de FMA. A inoculação de FMA promoveu modificações benéficas nas características anatômicas radiculares de milho híbrido, tais mudanças estão relacionadas com a proteção e sobrevivência do vegetal a estresses abióticos e bióticos.

**Palavras-chave:** Anatomia vegetal; milho; fungos micorrízicos.

## ABSTRACT

Among the main crops produced by Brazilian agriculture, corn (*Zea mays* L.) stands out. Corn is one of the most consumed cereals in the world and is important for meeting the nutritional needs of humans and animals. It belongs to the Poaceae family, originating in the Americas, and has been cultivated for at least five thousand years, as it has great nutritional value and productive potential. In this scenario, the use of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) stands out, which form a symbiosis with the plant, where there is a beneficial interaction, since the plant transfers the carbon produced through photosynthesis to the AMF, which, through their network of hyphae, absorb and transfer water and nutrients to the plant. The study aimed to characterize the roots of the hybrid corn variety (*Zea mays* L.), inoculated with mycorrhizal fungi of the genus *Glomus* and exposed to water stress. The experiment was conducted in the city of Imperatriz, at the stations of the Technological Diffusion Center. Planting was carried out in pots arranged in a greenhouse, with an experimental design used in randomized blocks with 4 treatments T1 (subjected to 40% of ET<sub>c</sub> without AMF); T2 (subjected to 40% of ET<sub>c</sub> + AMF); T3 (subjected to 100% of ET<sub>c</sub> without AMF) and T4 (subjected to 100% of ET<sub>c</sub> + AMF), both with 5 replicates. The cross sections were performed freehand, with the aid of a cutting blade, and were subsequently clarified with sodium hypochlorite, neutralized with acetic acid (0.2%), washed with distilled water and stained with a solution of astra blue and safranin. Treatments T1, T2 and T3 showed thinner epidermis and endodermis when compared to T4. In treatments T4 and T2, there was a significant increase in phloem thickness when compared to the other treatments. A reduction in xylem thickness was observed in treatments with the presence of AMF. The inoculation of AMF promoted beneficial changes in the anatomical characteristics of hybrid corn roots, and these changes are related to the protection and survival of the plant against abiotic and biotic stresses.

**Keywords:** Plant anatomy. Corn. Mycorrhizal fungi.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama esquemático do processo fotossintético de plantas C3, C4 e MAC.....	13
<b>Figura 2.</b> Visualização em microscópio óptico de fungos micorrízicos arbusculares presentes nas raízes.....	18
<b>Figura 3.</b> Esporos de fungos micorrízicos arbusculares.....	18
<b>Figura 4.</b> Amostra de solo (500g) para análise química e física. ....	19
<b>Figura 5.</b> Processo de autoclavagem do solo. ....	20
<b>Figura 6.</b> Plantio do milho híbrido e inoculação de fungos micorrízicos. ....	21
<b>Figura 7.</b> Processo de corte e coloração de amostras do sistema radicular de <i>Zea mays</i> L. ....	22
<b>Figura 8.</b> Secção transversal radicular de <i>Zea mays</i> com a presença de pelos absorventes em T4. Barra: 150 µm. ....	23
<b>Figura 9.</b> Cortes transversais de <i>Zea mays</i> mostrando as estruturas presentes na raiz. Observação em microscópio óptico 4x. <b>A:</b> T1 sem FMA a 40% da ETc. <b>B:</b> T2 com FMA a 40% da ETc. <b>C:</b> T3 sem FMA a 100% da ETc. <b>D:</b> T4 com MA a 100% da ETc. Barra: 150 µm. ....	24
<b>Figura 10.</b> Cortes transversais de <i>Zea mays</i> . Observação em microscópio em óptico 10x. <b>A:</b> T1. <b>B:</b> T2. <b>C:</b> T3. <b>D:</b> T4.....	25
<b>Figura 11.</b> Cortes transversais de <i>Zea mays</i> com observação em microscópio óptico em 4x e 40x. <b>A:</b> Detalhe da raiz lateral; <b>B:</b> Epiderme com espessamento em “O”; <b>C:</b> Raiz principal T4 com 100% da ETc com FMA. ....	26
<b>Figura 12.</b> Cortes transversais de <i>Zea mays</i> com observação em microscópio óptico em 40x. <b>A:</b> T1. <b>B:</b> T2. <b>C:</b> T3. <b>D:</b> T4.....	27



## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1.** Descrição dos tratamentos utilizados. .... 21

**Tabela 2.** Espessura ( $\mu\text{m}$ ) dos tecidos anatômicos radiculares. .... 24



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>12</b>
2.1	Características gerais da cultura do milho .....	12
2.2	Correlação entre a anatomia e a fisiologia de <i>Zea mays</i> .....	13
2.3	Estresse hídrico na planta.....	16
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>19</b>
3.1	Local do experimento.....	19
3.2	Cultura dos fungos micorrízicos ( <i>Glomus glomerulatum</i> ).....	19
3.3	Amostra e preparação do solo .....	20
3.4	Preparação do plantio.....	21
3.5	Análise anatômica .....	24
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>24</b>
4.1	Caracteres anatômicos.....	24
<b>5</b>	<b>DISCUSSÕES.....</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>32</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>32</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma cultura essencial para a segurança alimentar global, destacando-se como base alimentar para milhões de humanos e animais. De acordo com a (Conab, 2024), no Brasil, cerca de 21 milhões de hectares de milho está em cultivo, estimando-se uma safra de 119 milhões de toneladas para a temporada 2024/25. Esse cenário ressalta a importância de pesquisas e práticas sustentáveis para garantir uma produção eficiente.

A baixa disponibilidade hídrica é o principal fator abiótico que limita o pleno desenvolvimento do milho, causando perdas no seu desempenho produtivo (Santos *et al.*, 2020). Essa baixa produtividade anual ocorre devido à seca e influenciam de forma negativa em torno de 15% do potencial de rendimento, os maiores prejuízos ocorrem em países tropicais que dependem de uma temporada de chuvas relativamente imprevisível para o crescimento da cultura (Diniz, 2016).

Nesse contexto, para que ocorra o aumento da produtividade agrícola sem agredir o meio ambiente, são necessárias alternativas sustentáveis com mecanismos de baixo custo, destacando assim, a utilização de fungos micorrízicos arbusculares (FMA). Os mesmos, pertencem ao filo Glomeromycota (Tederso *et al.*, 2018), associados de forma simbiótica na raiz de quase todas as plantas terrestres (Wahab, 2023).

Na simbiose micorrízica, há uma interação benéfica (Sales *et al.*, 2022) pois, a planta transfere o carbono produzido através da fotossíntese para os FMA, estes, por sua vez, absorvem e transferem, por meio de sua rede de hifas para a planta, água, fósforo (P), cálcio (Ca), zinco (Zn) e outros nutrientes que possuem baixa mobilidade no solo e que são necessários para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Júnior *et al.*, 2018). Além disso, é notória a importância e, a eficiência dos FMAs, na absorção de nutrientes, recuperação de solos degradados, desenvolvimento embrionário e proteção de efeitos bióticos e abióticos no milho (Bona *et al.*, 2016; Gómez-Leyva *et al.*, 2023), dessa forma, eles contribuem na absorção de compostos que prejudiquem o meio ambiente causadores do efeito estufa, por meio da imobilização desses compostos, evitando que os mesmos entrem nos biogeoquímicos e causem desequilíbrio climático (Mickan *et al.*, 2021).

A anatomia vegetal permite compreender a relação entre alterações fisiológicas, morfoanatômicas e adaptações de plantas sob diferentes condições ambientais, tendo sido relevante nesses estudos, principalmente quando se deseja correlacionar resistências a fatores adversos (Matos, 2021). Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da

micorrização arbuscular na organização anatômica radicular do milho em condições de estresse hídrico.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Características gerais da cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.) tem origem das Américas, possui evidências arqueológicas que indicam o seu cultivo inicial há cerca de 9 mil anos na região do atual território mexicano (Alcântara, 2019). Derivado de uma planta silvestre conhecida como teosinte, ele foi domesticado por civilizações pré-colombianas como os maias, astecas e incas, que desenvolveram diversas variedades adaptadas a diferentes condições climáticas e de solo.

Após a chegada dos europeus ao continente americano, no final do século XV, o milho foi introduzido na Europa, África e Ásia, onde rapidamente se adaptou e passou a ser amplamente cultivado (Aquino; Lemos; Lopes, 2008). Atualmente, sua distribuição é global, sendo produzido em climas tropicais, subtropicais e temperados, com destaque para países como Estados Unidos, China, Brasil e México que possuem a maior produção mundial.

Pertencente à família Poaceae, o milho é uma planta monocotiledônea de grande relevância econômica e social. Em sua morfologia, apresenta um caule ereto e sólido, folhas alternadas e paralelinérveas, seu sistema radicular é fasciculado que confere boa ancoragem e absorção de nutrientes (Da Silva *et al.*, 2021). Suas flores estão distribuídas em inflorescências masculinas (panículas) no ápice da planta e femininas (espigas) nas axilas das folhas, sendo uma espécie monóica e de polinização cruzada predominantemente anemófila (Alves *et al.*, 2013).

Fisiologicamente, o milho utiliza o ciclo fotossintético C4, com as folhas em “grupamento Kranz” tal mecanismo lhe proporciona alta eficiência no uso de luz solar, água e dióxido de carbono, tornando-o adaptável a diferentes condições climáticas (Lacerda *et al.*, 2022; Gorska, 2018). Esta adaptação é caracterizada pela concentração de CO<sub>2</sub> em células especializadas (células do mesofilo e da bainha vascular), que aumentam a taxa fotossintética mesmo sob alta luminosidade e temperaturas mais elevadas. Além disso, possui um metabolismo rápido, com elevada capacidade de assimilação de nutrientes, essenciais para o seu bom desenvolvimento (Braga *et al.*, 2021).

O sistema vascular é bem desenvolvido, com presença de feixes condutores distribuídos de forma regular no caule e nas folhas. Essa organização estrutural confere o transporte eficiente

de água, nutrientes e fotoassimilados, garantindo altos índices de produtividade (Júnior *et al.*, 2017)

O milho é uma das culturas agrícolas mais cultivadas no mundo, destacando-se tanto pelo volume e produção quanto pela sua relevância econômica e alimentar. Sua versatilidade permite o uso em diferentes setores, desde a alimentação humana e animal, produção de biocombustíveis até a indústria farmacêutica e de bioplásticos (Shiferaw *et al.*, 2013; Melo *et al.*, 2018). O amido do milho é extraído principalmente do endosperma, sendo amplamente utilizado na fabricação de diversos produtos alimentícios, como espessantes, sobremesas e pães. Já o milho doce, popularmente conhecido como milho verde, é consumido de forma direta, seja cozido, assado ou como ingrediente em variados pratos típicos e receitas culinárias. Além do uso alimentar, os grãos de milho também têm aplicação na produção de bebidas alcoólicas, como uísque e cerveja, evidenciando sua versatilidade e importância econômica em diferentes setores (Felippe, 2007).

O desenvolvimento das cultivares de milho adaptadas as condições e as exigências do mercado é crucial para o aumento da produtividade e da competitividade do mercado nacional e do cenário global. De acordo com Silva *et al.* (2021), as pesquisas em biotecnologia e melhoramento genético tem permitido bons avanços, pois, a inserção de variedades de milho melhoradas geneticamente vem contribuindo para o aumento da resistência a doenças e pragas, bem como a tolerância a fatores abiótico como a seca, isso garante sustentabilidade na produção e o crescimento econômico agrícola.

## **2.2 Correlação entre a anatomia e a fisiologia de *Zea mays***

A anatomia das plantas C3 se diferem das C4, por possuírem mesofilo diferenciado na camada paliçádica que se situa abaixo da epiderme adaxial e na camada esponjosa, localizada acima da epiderme abaxial. Entretanto, as folhas das plantas C4 conferem camadas de paliçada nos dois lados das folhas ou possuem apenas parênquima clorofiliano, sem diferenciação em tecido paliçádico e esponjoso (Jiang *et al.*, 2011) (Figura 1).

A organização do sistema radicular do milho oferece uma exploração eficaz do solo, possui alta capacidade adaptativa, contribuindo para sua eficiência de absorção de água e nutrientes e resistência ao estresse hídrico (Pereira *et al.*, 2008). A raiz do milho é do tipo fasciculada, apresentando um sistema radicular adventício, sendo formado por raízes primárias que emergem a partir da germinação de sementes, secundárias e aéreas, crescendo a partir do nó mais baixo do caule, conferindo ancoragem e suporte ao vegetal (Apezzato-Da-Glória;

Carmello-Guerreiro, 2006). A anatomia radicular é composta pela epiderme, o cortéx é rico em células parenquimáticas, a endoderme possui uma camada de suberina que regula o fluxo de substâncias para o cilindro vascular.

As raízes, de modo geral, é um órgão de fixação e absorção da planta, sendo responsável por ancorá-la e por absorver água e nutrientes para seu desenvolvimento. Além disso, ela confere células especializadas, como os pelos radiculares, responsáveis por aumentar a superfície de contato com o solo, melhorando a absorção de íons minerais e água (Taiz; Zeiger, 2017). Ademais, a raiz armazena substâncias de reserva (amido), sendo importante na produção de hormônios vegetais (fitormônios) como as citocininas, que ajudam no crescimento e na diferenciação celular, otimizando o desenvolvimento e a sobrevivência do vegetal em diferentes condições ambientais (Raven; Evert; Eichhorn, 2014).

Outra estrutura essencial nos vegetais, são os estômatos, sendo eles mais abundantes nas folhas e responsáveis pela comunicação do ambiente externo com o interno. Na folha do milho, as estruturas estomáticas se desenvolvem entre as células comuns da epiderme e possuem células-guardas, sendo anfioestomática, ou seja, apresentam estômatos em ambas as faces, característica comum entre as Poaceas (Entringer, 2011). Os estômatos são importantes no mecanismo de perda de água e absorção de  $\text{CO}_2$ , os quais estão relacionados a extrema sensibilidade desta estrutura ao estresse ambiental e a fatores fisiológicos internos (Taiz; Zeiger, 2004); Baldo, 2007).

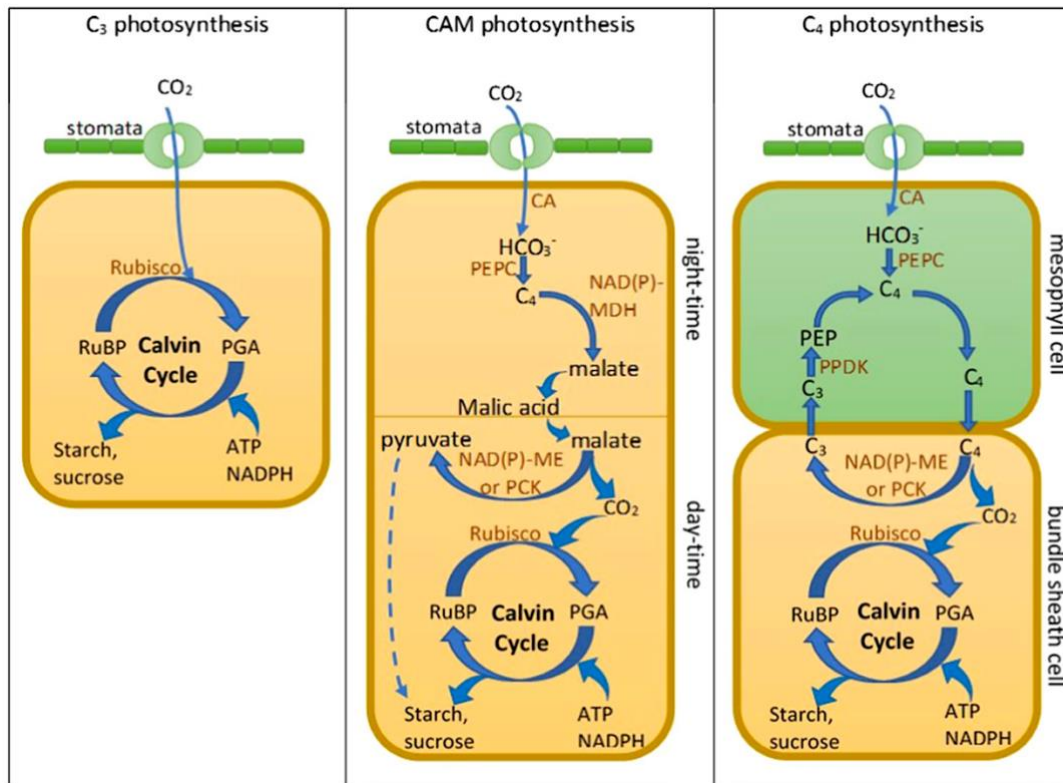
As plantas que possuem o mecanismo C4 possuem organização do tipo “Kranz”, apresentando diferenciação nas células do mesófilo e na bainha perivascular. Ademais, elas apresentam como característica essencial um mecanismo que concentra  $\text{CO}_2$  nas folhas, saturando a fotossíntese e evitando a fotorrespiração, e por esse motivo as plantas C4 possuem altas taxas fotossintéticas (Apezzato-Da-Glória; Carmello-Guerreiro, 2006).

Os vegetais de mecanismo C4 fazem pouca fotorrespiração devido a sua alta concentração de  $\text{CO}_2$  nas células da bainha, acelerando a reação da carboxilase em relação à de oxigenase, sendo, muito importante em altas temperaturas. Dessa forma, as plantas C4 possuem vantagens em ambientes quentes e sob alta iluminação (Valente *et al.*, 2011).

A anatomia Kranz tem como característica uma camada de células da bainha do feixe vascular que são bem desenvolvidas e envolvem o xilema e floema, responsáveis por fazer a fotossíntese C4. Elas realizam a separação espacial entre as fases de fixação e redução do  $\text{CO}_2$ . O  $\text{CO}_2$  é fixado pela enzima fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPC) nas células do mesófilo, produzindo ácidos C4 (ácido oxalacético), transportados na forma de malato e aspartato para as

células da bainha dos feixes vasculares, onde ocorre a descarboxilação e a concentração de  $\text{CO}_2$  é maior e este é refixado pela Rubisco, completando o ciclo (Figura 1) (Furbank; Hatch, 1987; Cacefo, 2017).

**Figura 1.** Diagrama esquemático do processo fotossintético de plantas  $\text{C}_3$ ,  $\text{C}_4$  e MAC.



Fonte: Dehigaspitiya *et al.* (2019)

A estrutura anatômica das raízes é essencial na adaptação das plantas às condições ambientais, e alterações na sua anatomia podem afetar a absorção de água e nutrientes pela raiz. A estrutura morfológica e anatômica das raízes pode ser usada para aumentar a eficiência de absorção em plantas cultivadas e, conseqüentemente, o rendimento da cultura (Tholen; Boom; Zhu, 2012; Niu *et al.*, 2020;).

Para Lino (2011), através da evolução do conhecimento científico e do desenvolvimento de novas metodologias, a anatomia vegetal tornou-se uma ferramenta de grande valia, pois, identifica as estruturas e caracteriza diferentes genótipos e suas interações com o ambiente. Os estudos em anatomia vegetal realizados em plantas de interesse econômico e comercial, tem se destacado na botânica, isso porque o corpo do vegetal é o seu principal objeto de estudo. As práticas agrícolas atuais carecem de uma atenção especial em relação aos vegetais e os

seus diversos manejos, pois, o corpo do vegetal está intimamente ligado à essas práticas (Silva; Alquini; Cavallet, 2005).

O estresse hídrico e a salinidade do solo são problemas recorrentes na agricultura brasileira, dessa forma a anatomia vegetal permite o estudo do comportamento do vegetal quando submetido a estresses bióticos e abióticos. Hasana e Miyake (2017), relataram em seu estudo sobre o efeito da salinidade na estrutura anatômica radicular e foliar do milho, concluíram que o estresse salino danificou as células da epiderme, as células do mesófilo da folha e células do parênquima do córtex e medula da raiz, essas alterações ocorrem devido à toxicidade iônica causada pelo excesso de sódio íon no tecido. Tais estudos demonstram que a salinidade e o estresse hídrico são fatores danosos à anatomia radicular e foliar (Ristic; Jenks, 2002).

### **2.3 Estresse hídrico na planta**

Ecologicamente, a água é um recurso vital para o desenvolvimento das plantas, pois, desempenha um papel crucial nos processos fisiológicos, tais como a fotossíntese, regulação térmica e o transporte de nutrientes (Pimentel, 2004). Portanto, a disponibilidade de água é um fator determinante para a produtividade e saúde das culturas, tendo influência direta no rendimento agrícola (Magalhães, 2006).

O estresse hídrico é um fator limitante para o desenvolvimento das plantas, pois, afeta diretamente processos fisiológicos essenciais, como a fotossíntese, a respiração e o transporte de nutrientes (Bianchi; Germino; Almeida, 2016). O déficit hídrico reduz a abertura dos estômatos, diminuindo a absorção de CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, a produção de energia. Além disso, prejudica o fluxo de seiva e a absorção de nutrientes pelas raízes, comprometendo o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Cavalcante; Cavallini; Lima, 2009). Ademais, o estresse hídrico pode levar à morte celular e ao colapso de tecidos vitais, reduzindo a capacidade de adaptação das plantas ao ambiente dependendo da espécie de planta e do tempo de exposição a deficiência hídrica (Osakabe *et al.*, 2014).

As plantas quando submetidas ao estresse hídrico ativam uma série de respostas fisiológicas e bioquímicas na tentativa de sobreviver em condições adversas, como a redução da abertura estomática para diminuir a perda de água por transpiração, o que pode afetar a fotossíntese e, conseqüentemente, o crescimento da planta (Moro; Broetto; Moro, 2015). Tais condições de escassez de água culminam no decréscimo do potencial hídrico do solo e inibem a fotossíntese (Guimarães; Rocha; Paternian, 2019).

O milho tem alta demanda por água, carecendo cerca de 250 a 500mm de água por ciclo (Silva *et al.*, 2021). Devido a isso, este vegetal possui alta sensibilidade ao estresse hídrico, limitando o seu crescimento, principalmente sob lâminas inferiores a 80% da evapotranspiração da cultura (ETc) (Brito *et al.*, 2013). Nesse viés, os impactos negativos do déficit hídrico no milho estão sendo analisados a níveis fisiológicos, bioquímicos e moleculares. Estes impactos incluem a redução da taxa fotossintética, redução do conteúdo relativo de água da folha, dessecação celular, peroxidação lipídica, formação de radicais livres, atividade enzimática perturbada e oxidação de proteínas (Mishra *et al.*, 2020).

## **2.5 Fungos micorrízicos e a produção agrícola**

Os estudos sobre fungos micorrízicos vem ganhando destaque devido à sua importância para o desenvolvimento sustentável e eficiente da agricultura e conservação ambiental. Até agora, foram identificadas cerca de 300 espécies de fungos micorrízicos arbusculares, pertencentes à família Glomeraceae (Dantas, 2015). Porém, acredita-se que existem muitas espécies ainda não identificadas devido à grande diversidade genética observada. Essa área de estudo também ajuda a entender como microrganismos podem melhorar o cultivo agrícola e a revegetação de áreas degradadas.

Diversas espécies vegetais têm sido inoculadas com fungos micorrízicos para avaliar seus benefícios. Estudos com milho, soja, trigo, e plantas frutíferas demonstraram maior produtividade e eficiência no uso de recursos após a inoculação (Da Silva *et al.*, 2018; Malffati e Da Cruz, 2019; Turchetto *et al.*, 2022). Além disso, as plantas nativas usadas na recuperação de biomas, como Cerrado e Mata Atlântica, também demonstraram resultados promissores ao serem inoculadas (Prado *et al.*, 2023). Esses estudos ajudam a compreender as interações ecológicas e o papel dos fungos na manutenção da fertilidade do solo. Assim, a aplicação de fungos micorrízicos pode se tornar uma prática chave para a agricultura sustentável e a conservação de ecossistemas.

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA), são microrganismos simbióticos que estabelecem relações mutualísticas com as raízes das plantas, eles desempenham um papel fundamental na sustentabilidade agrícola (Brito *et al.*, 2017). Essa simbiose é caracterizada pela troca de nutrientes: enquanto as plantas fornecem carboidratos derivados da fotossíntese, os fungos facilitam a absorção de água e nutrientes essenciais, como fósforo e nitrogênio, que são frequentemente limitantes no solo (Rodrigo; Barroso; Figueiredo, 2018). Além disso, eles aumentam a área de exploração do solo devido à extensão de seus micélios.

A presença de fungos micorrízicos reduz a dependência de fertilizantes químicos, promovendo uma agricultura mais sustentável. De acordo com Da Silva *et al.* (2019), esses fungos otimizam o uso de recursos minerais e minimizam a lixiviação de nutrientes no solo, um problema crítico em sistemas agrícolas intensivos. Isso contribui diretamente para a redução dos impactos ambientais da agricultura convencional.

Outra pauta significativa a respeito dos FMA é o aumento da tolerância das plantas a estresses abióticos, como seca, salinidade e temperaturas extremas. A rede de hifas dos fungos micorrízicos melhoram a retenção de água, facilitando a adaptação das plantas em condições adversas, sendo eficiente em tempos de mudanças climáticas (De Melo *et al.*, 2017). Essa resiliência pode determinar a produtividade agrícola em áreas onde os recursos hídricos são escassos.

Os fungos micorrízicos também desempenham um papel essencial no controle de patógenos e pragas do solo. Estudos mostram que a simbiose micorrízica ativa mecanismos de defesa nas plantas, inibindo o desenvolvimento de patógenos (Monte; Bettiol; Hermosa, 2019). Essa defesa biológica reduz a necessidade de agroquímicos, garantindo práticas agrícolas mais sustentáveis, trazendo segurança para o meio ambiente e para a saúde humana.

Além das vantagens para a agricultura, os fungos micorrízicos contribuem para a estruturação do solo, melhorando sua qualidade física e biológica. Eles produzem substâncias como a glomalina, que auxilia na agregação do solo e no aumento da matéria orgânica, tornando-o mais fértil e resistente à erosão (Silva *et al.*, 2016). Isso é fundamental para a sustentabilidade a longo prazo de áreas agrícolas intensamente exploradas.

Na agricultura orgânica, os fungos micorrízicos possuem ainda mais relevância, pois promovem maior biodiversidade e homeostase no ecossistema agrícola. De acordo com De Jesus *et al.* (2019) os sistemas agrícolas orgânicos apresentam maior diversidade de espécies micorrízicas, pois, está diretamente associado à estabilidade da produtividade e à resiliência ambiental.

A utilização de inoculantes à base de fungos micorrízicos é uma estratégia promissora para aumentar a produtividade agrícola sem comprometer o meio ambiente. Essas biotecnologias têm se mostrado eficazes em culturas como milho, trigo e soja, especialmente em solos pobres em nutrientes (De Jesus *et al.*, 2021). Entretanto, é de suma importância considerar as condições edafoclimáticas e a compatibilidade entre os fungos e as plantas para maximizar a eficiência dessa prática.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Local do experimento

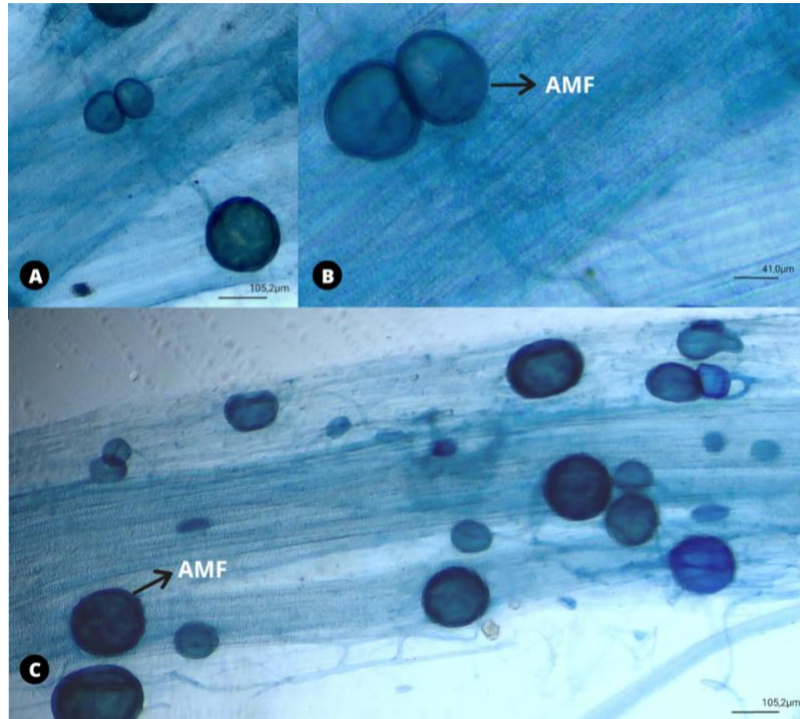
O experimento foi conduzido na cidade de Imperatriz, no estado do Maranhão, nas estações experimentais do Campus da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL). A classificação climática segundo (Alvares, 2013) caracteriza as regiões como tipo B1wA'a', úmido com moderada deficiência hídrica.

#### 3.2 Cultura dos fungos micorrízicos (*Glomus glomerulatum*)

A espécie de fungo micorrízico utilizada no presente estudo é a *Glomus glomerulatum* do gênero *Glomus* (Figura 2), sendo o gênero com mais espécies descritas até então, pertencente à família Glomeraceae (Figura 3). O domínio das espécies de Glomeraceae, está relacionada à sua alta taxa reprodutiva quando comparada aos demais gêneros de FMA, ela pode se adaptar a condições variáveis de solo, sobrevivendo em solos ácidos (Renny *et al.*, 2017) e conseguindo explorar outros nichos e regiões diferentes no solo e serapilheira, como as espécies esporocárpicas que são exclusivamente, pertencentes à família Glomeraceae (Jobim *et al.*, 2019) e podem crescer em diversas condições ambientais. Essas famílias são comumente reportadas como as mais representativas em diversos estudos (Bonfim *et al.*, 2016; Marinho *et al.* 2019; Melo *et al.*, 2020), principalmente em trabalhos que propuseram avaliar a serapilheira (Sheldrake *et al.*, 2017).

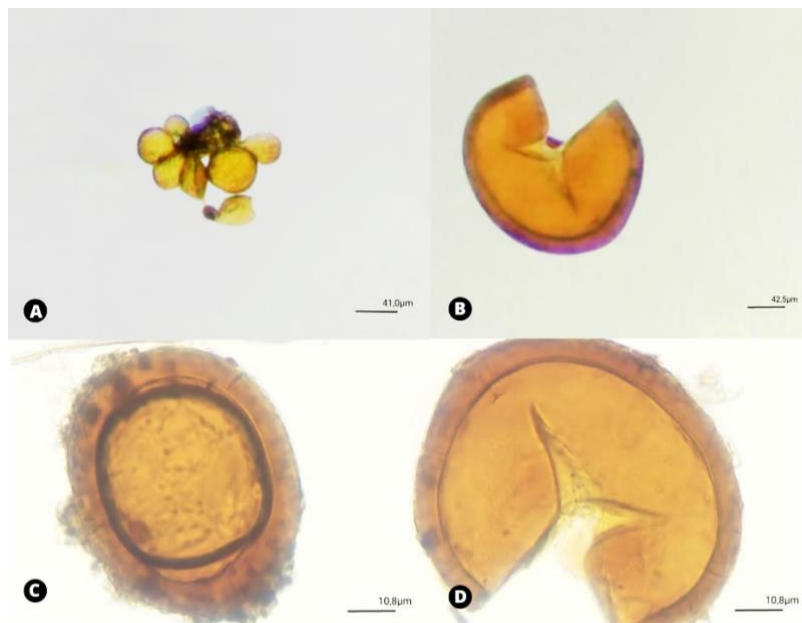
Para a inoculação nos tratamentos, foram utilizadas culturas de FMA já prontas congeladas que foram cedidas pela coleção culturas de fungos micorrízicos existente no Laboratório de Microbiologia e Saúde da Uemasul, onde foi adicionado 50g de solo com fungos micorrízicos junto à semente do milho na parte central de cada vaso.

**Figura 2.** Visualização em microscópio óptico de fungos micorrízicos arbusculares presentes nas raízes. Legenda: AMF = fungos micorrízicos arbusculares. Barra: A: 105,2 µm; B: 41 µm; C: 105,2 µm.



Autor, 2025.

**Figura 3.** Esporos de fungos micorrízicos arbusculares. Barra: A: 41  $\mu\text{m}$ ; B: 42,5  $\mu\text{m}$ ; C: 10,8  $\mu\text{m}$ . D: 10,8  $\mu\text{m}$ .



Autor, 2025.

### 3.3 Amostra e preparação do solo

O solo foi coletado na chácara Afrika (-5.5338118, - 47.515015), localizada na Bela Vista, município de São Miguel, Tocantins. Posteriormente, coletou-se 500g de amostras de solo

(Figura 4), para a realização de análise química (macronutrientes e micronutrientes) e física, para verificar as condições do solo.

As amostras de solo foram coletadas em zig-zag de forma aleatória. A cada ponto de amostragem, a vegetação, a cobertura vegetal morta e o material grosseiro da superfície do terreno foram removidos com auxílio de enxada. As amostras foram coletadas a uma profundidade de 10 a 20 cm com auxílio do trado manual, posteriormente depositadas em bandeja de homogeneização formando uma amostra composta que foi acondicionada em saco plástico etiquetado e identificada para envio ao laboratório.

**Figura 4.** Amostra de solo (500g) para análise química e física.



Fonte: Autor, 2025.

### 3.4 Preparação do plantio

O solo para plantio foi autoclavado a 120 °C /1,5 atm duas vezes por 1 hora (Figura 5), sendo repetido a cada 24 horas durante dois dias para esterilização do solo e posterior aplicação de fungos micorrízicos (*Glomus glomerulatum*) que foram disponibilizados pelo Laboratório de Microbiologia e Saúde, UEMASUL.

**Figura 5.** Processo de autoclavagem do solo.



Fonte: Autor, 2025.

Utilizou-se um milho híbrido já utilizada pelos produtores da região. O plantio foi realizado manualmente em vasos de 5 litros de capacidade dispostos em casa de vegetação, com o delineamento experimental em blocos casualizados com 4 tratamentos e 5 repetições, onde 2 tratamentos foram submetidos a 40% da evapotranspiração da cultura (ETc) e outros 2 a 100% da ETc (Tabela 1). O espaçamento entre os vasos foi de 0,60 m de comprimento com 0,40 m entre as plantas, os tratos culturais foram realizados seguindo as recomendações para a cultura (Galvão *et al.*, 2014) (Figura 6).

A ETo foi determinada através de dados de evaporação do tanque classe A na estação experimental do Centro de Difusão Tecnológica de Imperatriz. O Kc da cultura seguiu-se o proposto por Doorenbos e Pruitt (1976), que determina a evapotranspiração da cultura (ETc) com a seguinte fórmula:

$$ETc = ETo \times Kc$$

ETc = evapotranspiração da cultura (mm/dia).

ETo = evapotranspiração de referência (mm/dia).

Kc = coeficiente da cultura.

$$ETc = 3,81 \times 1,15$$

$$ETc = 4,38\text{mm/dia ou } 4,38\text{L/m}^2$$

Desta forma, multiplica-se o valor da ETc pela área do vaso, que corresponde a  $0,12\text{m}^2$ , logo:

$$ETc = 4,38 \text{ L/m}^2 \times 0,12\text{m}^2$$

$$ETc = 0,50L \text{ ou } 500ml$$

O valor de 500ml encontrado equivale a 100% da ETc, para calcular a ETc a 40% segue por regra de três:

$$500ml \text{ ----- } 100\%$$

$$X \text{ ----- } 40\%$$

$$X = 200ml$$

**Tabela 1:** Descrição dos tratamentos utilizados.

Tratamentos	Descrição
T1	Submetido a 40% ETc sem FMA
T2	Submetido a 40% ETc + FMA
T3	Submetido a 100% ETc sem FMA
T4	Submetido a 100% ETc + FMA

**Figura 6.** Plantio do milho híbrido e inoculação de fungos micorrízicos.



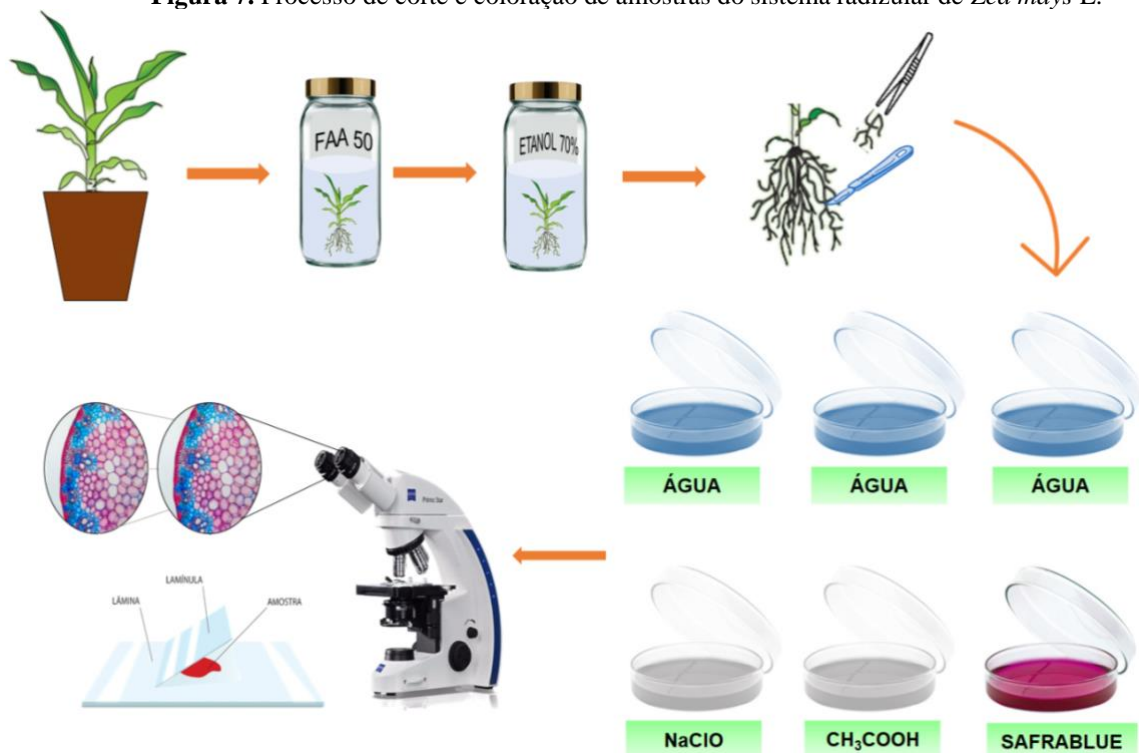
Fonte: Autor, 2025.

Avaliou-se o índice de clorofila Falker (IFC) de 15 em 15 dias durante os 2 meses de plantio utilizando o medidor SPAD (Soil Plant Analysis Development) - 502 plus, para isso, foi realizado o procedimento de calibração conforme as orientações do fabricante para assegurar a precisão das leituras. Foram escolhidas folhas maduras e representativas da planta para uma análise abrangente, estas foram cuidadosamente posicionadas no local designado do medidor. Após a estabilização da leitura no SPAD, os valores indicados com o conteúdo de clorofila nas folhas avaliadas foram registrados. A medição foi repetida em diversas folhas, escolhidas em diferentes partes da planta, proporcionando uma média representativa do índice de clorofila. A coleta foi realizada manualmente dois meses após o plantio, período necessário para que ocorra a simbiose entre o fungo micorrízico e a raiz.

### 3.5 Análise anatômica

Parte das amostras coletadas das raízes foram fixadas em FAA<sub>50</sub> (formalina 10%, ácido acético 5% e etanol 5%) e conservadas em álcool a 70° GL para análises anatômicas. Para os cortes anatômicos em raízes, executou-se secções transversais à mão livre com auxílio de lâminas comerciais, posteriormente, foram clarificadas com hipoclorito de sódio (20%), neutralizadas com ácido acético (0,2%), lavadas com água destilada e, por fim, coradas com uma solução de azul de astra e safranina (Kraus; Arduin, 1997) e montadas com glicerina 50% (Figura 7). Para a observação da raiz, foi utilizado o microscópio óptico para verificação dos tecidos anatômicos radiculares e suas possíveis alterações, as quais podem ser causadas pelos tratamentos utilizados.

**Figura 7.** Processo de corte e coloração de amostras do sistema radicular de *Zea mays* L.



Fonte: Noronha, 2022.

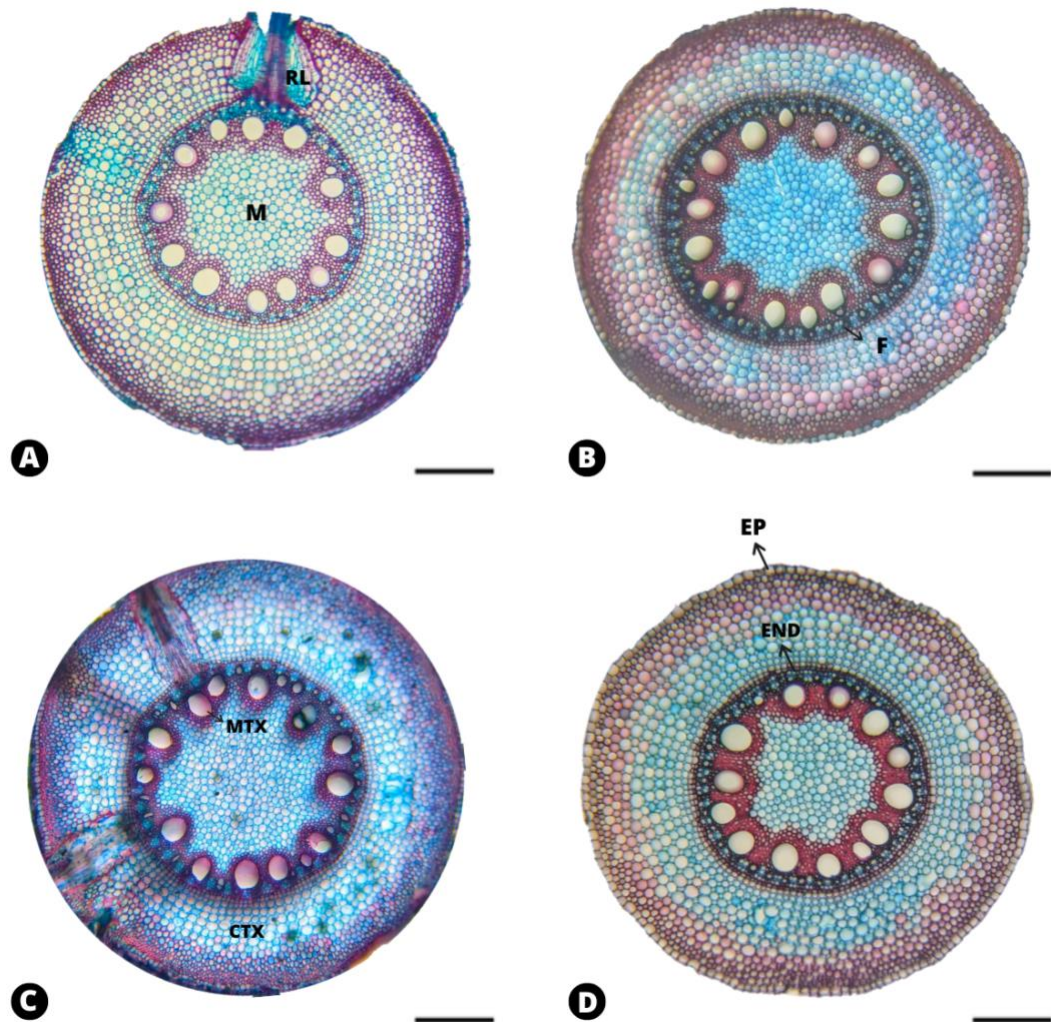
## 4 RESULTADOS

### 4.1 Caracteres anatômicos

De forma geral a estrutura radicular em seção transversal de todos os tratamentos apresentaram formato circular, sendo característico da cultura (Figura 8A-D). Em todos os tratamentos, a epiderme é uniestratificada, apresentando paredes celulares e cutículas espessas

possuindo um formato quadrado pentagonal ou hexagonal. Entretanto, o tratamento T4 (Figura 8D) apresentou uma epiderme com espessamento em “O”, sendo ela a mais espessa em relação aos demais tratamentos. Entre T2 (Figura 8B) e T1 (Figura 8A) houve uma diferença significativa, onde T2 que foi inoculado com FMA apresentou maior espessura da epiderme radicular (Tabela 2).

**Figura 8.** Cortes transversais de *Zea mays* mostrando as estruturas presentes na raiz. Observação em microscópio óptico 4x. A: T1 sem FMA a 40% da ETc. B: T2 com FMA a 40% da ETc. C: T3 sem FMA a 100% da ETc. D: T4 com FMA a 100% da ETc. Legenda: EP = Epiderme; RL = Raiz lateral; CTX = Córtex; END = Endoderme; MTX = Metaxilema; F = Floema. Barra: 150  $\mu$ m.



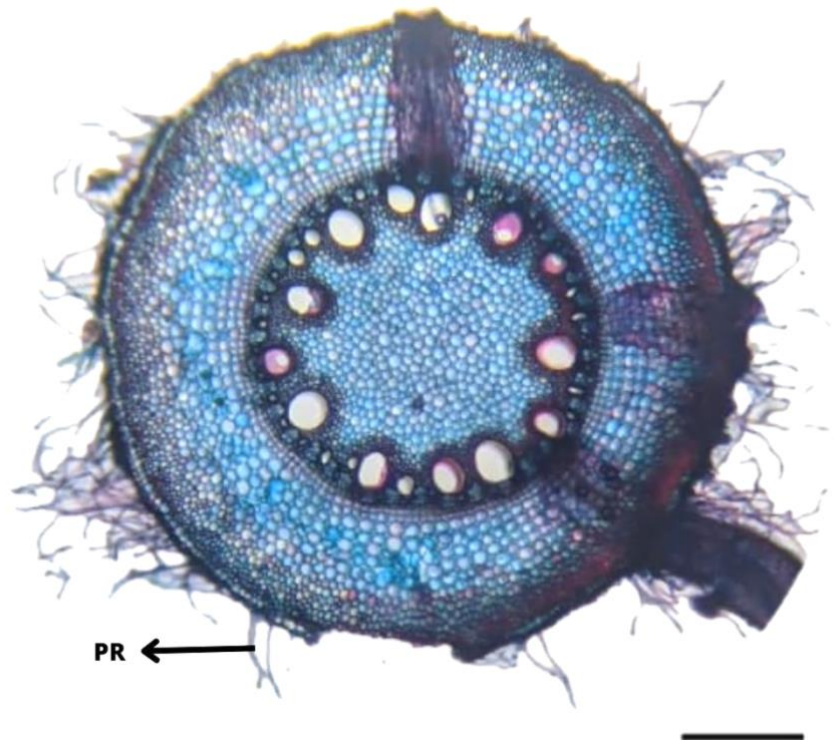
Fonte: Autor, 2025.

**Tabela 2:** Espessura ( $\mu\text{m}$ ) dos tecidos anatômicos radiculares ( $p < 0,05$ ). Legenda: CV= Coeficiente de variação.

Tratamento	Espessura dos tecidos anatômicos radiculares			
	Epiderme	Endoderme	Floema	Xilema
T1	5.08c	2.48d	48.52b	81.92a
T2	5.96b	3.54c	52.80a	75.79b
T3	6.08b	3.78b	51.34ab	81.44a
T4	6.28a	4.16a	55.11a	73.28b
CV (%)	1.68	3.65	4.43	3.80

Foram observados pelos radiculares absorventes com variações de tamanho em todos os tratamentos, entretanto, nas raízes com inoculação de FMA observou-se pelos mais alongados com ramificação bifurcada (Figura 9).

**Figura 9.** Secção transversal radicular de *Zea mays* com a presença de pelos absorventes em T4. PR = Pelos radiculares. Barra: 150  $\mu\text{m}$ .



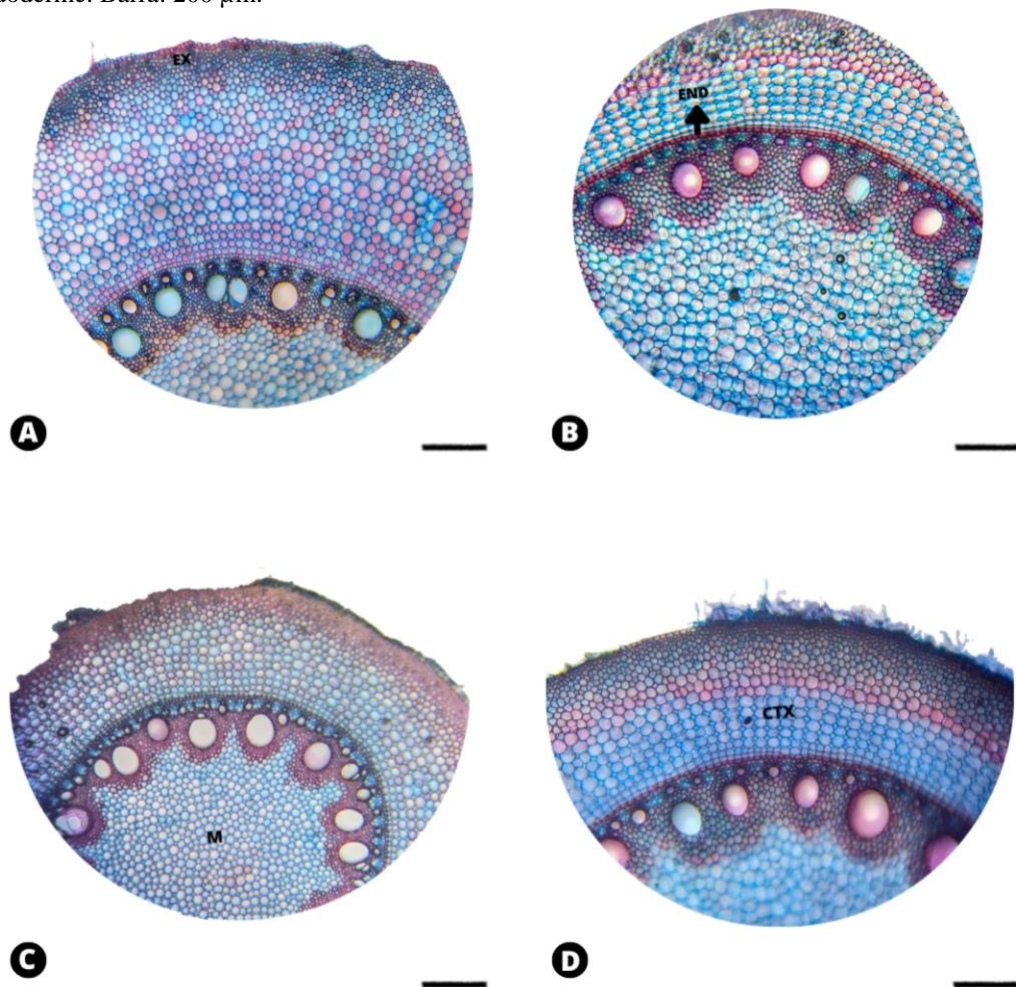
Fonte: Autor, 2025.

O córtex do híbrido estudado fica localizado entre a epiderme e o cilindro vascular, é uma região formada por células parenquimáticas com paredes delgadas e vários espaços intercelulares. Em todos os tratamentos foi observado o córtex dividido em três partes: a exoderme (região periférica do córtex); parênquima cortical (região mediana do córtex) e a endoderme (região interna do córtex) (Figura 10A-D).

A exoderme uniestratificada fica localizada logo abaixo da epiderme, possui células de formato redondo, pentagonal e hexagonal em todos os tratamentos. Esta camada possui espessamento em “O”, não sendo observado diferenças entre os tratamentos.

O parênquima cortical compreende uma grande parte da raiz. Em relação ao número de camadas, houve uma diferenciação considerável entre os tratamentos, no qual T1 apresentou até 18 camadas, em T2 foi visualizado cerca de 11 camadas, em T3 observou-se 13 camadas e T4 apresentou 10-12 camadas.

**Figura 10.** Cortes transversais de *Zea mays*. Observação em microscópio em óptico 10x. A= T1. B= T2. C= T3. D= T4. Legenda: CTX= Córtex. M= Medula. EX= Exoderme. PC= Parênquima Cortical. RL= Raízes Laterais END= Endoderme. Barra: 200  $\mu$ m.



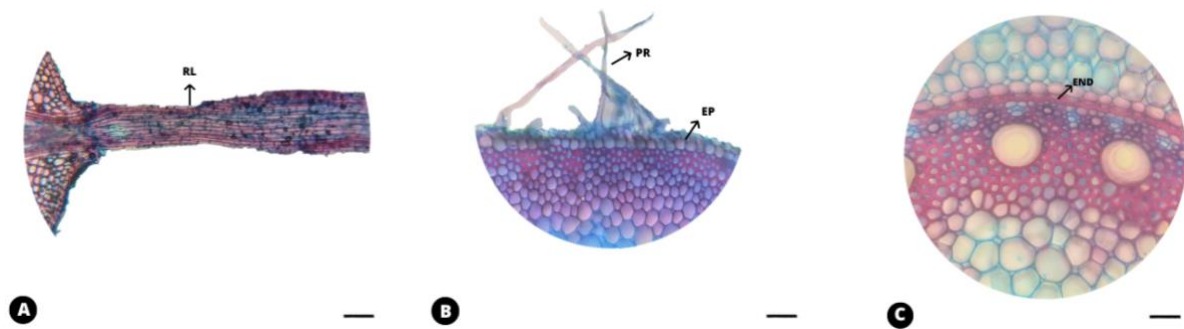
Fonte: Autor, 2025.

A endoderme do híbrido estudado consiste em uma camada de células comumente quadradas e que possuem um espessamento de suberina denominado estrias de Caspary em formato de “U”, não havendo alteração em seu formato quando inoculado com FMA e irrigado com 100% ou 40% da ETc (Fig. 11C). Entretanto, no tratamento T4 houve um aumento

significativo na espessura da endoderme quando comparados aos demais tratamentos. T2 e T3 também apresentaram maior espessura da endoderme quando comparados a T1 (Tabela 2).

O cilindro vascular é bem desenvolvido em todos os tratamentos, sendo encontrado no formato circular. Os cilindros de maiores tamanhos foram encontrados nos tratamentos T2 e T4 corroborando com uma menor região cortical em ambos, esta última possui uma região cortical menor devido ao grande cilindro vascular. As raízes laterais (Figura 11A) são formadas próximas do meristema apical da raiz, possuem epiderme uniestratificada e células corticais foram observadas em todos os tratamentos estudados.

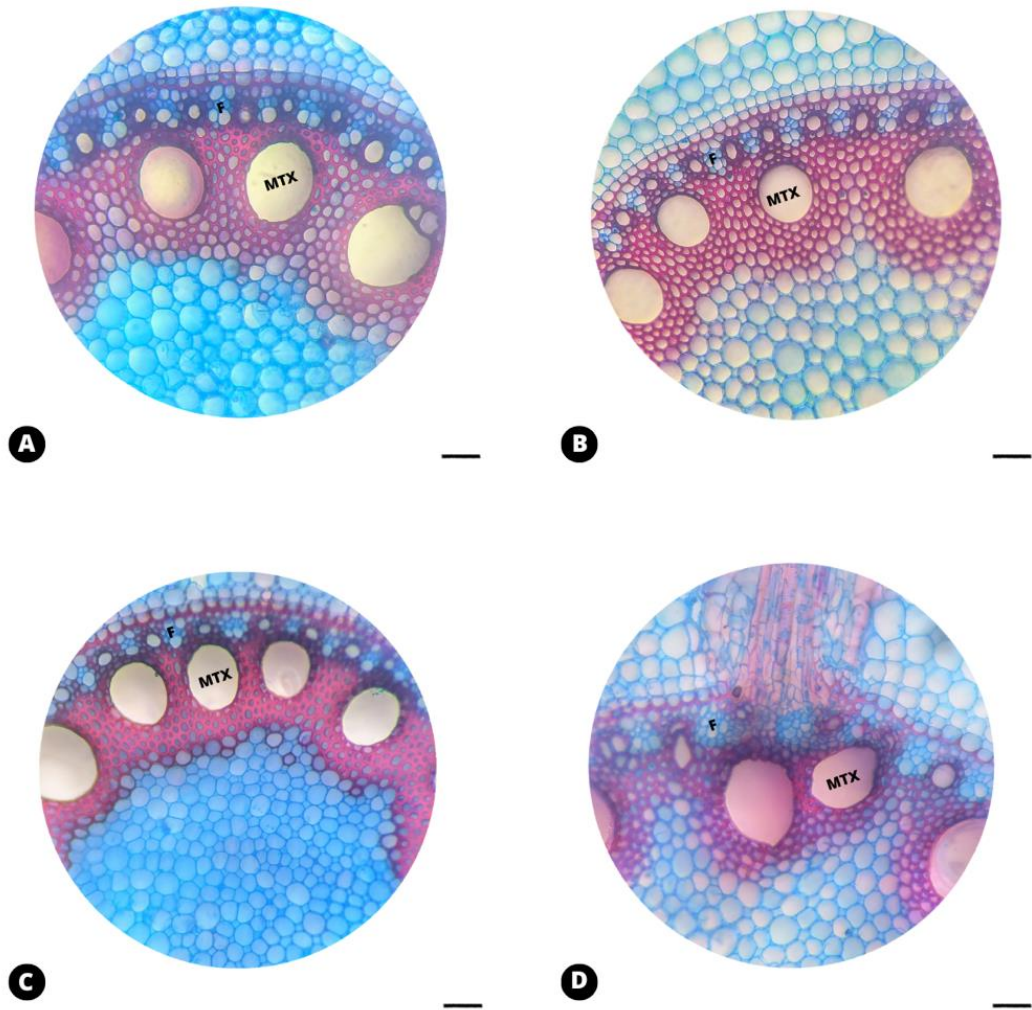
**Figura 11.** Cortes transversais de *Zea mays* com observação em microscópio óptico em 4x e 40x. A: Detalhe da raiz lateral; B: Epiderme com espessamento em “O”; C: Raiz principal T4 com 100% da ETc com FMA. Legenda: RL= Raiz Lateral; PR = Pelos Radiculares; EP= Epiderme; D: END= Endoderme. Barra: A: 60µm; B: 60µm; C: 60µm.



Fonte: Autor, 2025.

O tecido floemático é conspícuo em todos os tratamentos estudados. Em T2 T3 e T4 foi aferido uma maior espessura do floema que se alternam com o protoxilema (Figura 12). O metaxilema em T2 visualizou-se uma média de 28 vasos, em T3 um total de 32 vasos (Figura 12 B-C), enquanto em T1 observou-se até 25 vasos de maior espessura (Fig. 12 A) e em T4 foi visualizado até 30 vasos de metaxilema (Figura 12D). Nos tratamentos onde houve a inoculação de fungos micorrízicos, verificou-se uma redução na espessura do xilema, (Tabela 2).

**Figura 12.** Cortes transversais de *Zea mays* com observação em microscópio óptico em 40x. A: T1. B: T2. C: T3. D: T4. MTX= Metaxilema. F= Floema. Barra: 60 µm.



Fonte: Autor, 2025.

## 5 DISCUSSÕES

A epiderme das plantas vasculares é um tecido, de forma geral, formado por uma camada de células de formato irregular, achatadas, vivas e aclorofiladas. Nos tratamentos com inoculação de FMA T2 e T4, verificou-se ao aumento da espessura da epiderme quando comparados aos demais tratamentos. De acordo com Souza *et al.* (2009), a epiderme apresenta essa adaptação anatômica, pois assume o papel de barreira para dificultar a entrada de patógenos na raiz. Portanto, os fungos mizorrízicos, quando inoculados no híbrido, podem favorecer a sobrevivência do milho em condições de estresse abiótico e biótico por apresentar maior espessamento da epiderme radicular.

Os pelos radiculares são extensões de uma célula epidérmica, tipicamente unicelulares e não ramificados, sendo ramificados mais raros (Evert, 2006). No presente estudo, foram encontrados uma maior quantidade de pelos curtos e não ramificados, porém T2 e T4 apresentou pelos longos e ramificados. Essa ramificação pode ser explicada como um

recurso avançado e especializado para plantas que vivem em solos secos e essa expressão fenotípica em determinadas raízes ajuda na eficiência de absorção de água do vegetal (Medeiros, 2006). Sugere-se que a simbiose micorrízica pode ter propiciado um alongamento nos pelos radiculares dos tratamentos inoculados com FMA.

Nos tratamentos T2, T3 e T4 observou-se o córtex com menor número de camadas, sendo menos espesso. Pereira *et al.* (2008) afirmam que uma área cortical menor auxilia a condutividade hidráulica da raiz em detrimento à diminuição da distância necessária para a água chegar ao xilema. Um estudo relata que a menor espessura do córtex ajuda em uma maior flexibilidade da raiz, facilitando o seu desdobramento e penetração em solos compactados (Chimungu *et al.*, 2015). Os dados sugerem que os tratamentos inoculados com FMA propiciaram a redução da área cortical, reduzindo o custo metabólico do vegetal para a exploração do solo, o que pode favorecer o desenvolvimento da planta sob estresse abiótico.

Internamente ao córtex mediano, visualiza-se a endoderme, uma barreira apoplática que forma uma bainha em torno do cilindro vascular (Van Fleet, 1961; Enstone *et al.*, 2003). Nos tratamentos estudados, observou-se células quadradas com espessamento em “U”, sendo uma característica dos grupos de monocotiledôneas (Silva; Scatena, 2011). Em T2 e T4, ambos com FMA, houve um aumento na espessura da endoderme quando comparados aos demais tratamentos do presente estudo, sugerindo que na raiz do milho os fungos micorrízicos estimulem o espessamento dessa endoderme, contribuindo no cultivo desse vegetal uma vez que a endoderme radicular pode servir como uma barreira física contra a entrada de patógenos (Souza *et al.*, 2009).

Entre os tratamentos avaliados, verificou-se que o T1 exibiu uma menor quantidade de vasos xilemáticos. Nos tratamentos com presença de FMA, foi possível observar uma diminuição na espessura do xilema quando comparados aos tratamentos sem inoculação de FMA. O FMA pode ter influenciado na relação hídrica do híbrido de milho, pois, a redução no diâmetro dos vasos do xilema está relacionada com a diminuição do risco de embolismo e o aumento da resistência do fluxo de água, indicando uma maior condutividade hidráulica (Souza *et al.* 2009). Alterações semelhantes nos vasos de xilema foram observadas em genótipos de milho tolerantes à seca (Peña-Valdivia *et al.*, 2005) e em milhos híbridos (Li *et al.*, 2009).

Nos tratamentos T2, T3 e T4 foi verificado uma maior espessura do floema, quando comparado a T1, sendo mais espesso nos tratamentos com FMA. De acordo com Souza *et al.* (2009), o aumento na espessura do floema pode influenciar em um maior fluxo de

carboidratos, propiciando mais substrato respiratório para plantas, sendo possível uma maior tolerância a estresse hídrico. De acordo com os resultados analisados, sugere-se que os fungos micorrízicos trouxeram modificações benéficas ao híbrido de milho, uma vez que aferiu-se uma maior espessura do floema.

## 6 CONCLUSÕES

A inoculação de fungos micorrízicos promoveu modificações nas características anatômicas radiculares do milho híbrido, tais como o espessamento da endoderme e floema, alongamento dos pelos radiculares e a redução da área cortical e do diâmetro do xilema, estas alterações foram condicionadas pelo estresse hídrico. As mudanças ocorridas nos tecidos anatômicos estão relacionadas com a proteção e sobrevivência do vegetal a estresses abióticos e bióticos.

Portanto, a integração dos fungos micorrízicos na produção agrícola representa uma alternativa viável para enfrentar os desafios atuais da agricultura a dependência de insumos químicos e as mudanças climáticas. Investir em pesquisas sobre essas simbioses e em práticas de manejo que favoreçam sua ocorrência é essencial para um sistema agrícola mais produtivo, resiliente e sustentável.

## REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, Karina Fernandes de. **A origem do milho na América Latina, história, mitos e seu uso no México e no Brasil**. 2019.
- ALVARES, C. A. et al. **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorol Z, Piracicaba, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVES, VALDECIR BATISTA; CECCON, GESSÍ; LEITE, LEONARDO FERNANDES. Morfologia e produtividade de híbridos de milho Safrinha solteiro e consorciado com braquiária. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 12, n. 2, p. 152-163, 2013.
- APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. **Anatomia vegetal**. 2. ed. Viçosa: 438p. UFV, 2006.
- AQUINO, Rubim Santos Leão de; LEMOS, Nivaldo Jesus Freitas de; LOPES, Oscar Guilherme Pahl Campos. **História das Sociedades Americanas**. 12. ed. Rio de Janeiro: Record, 2008.
- BIANCHI, Leandro; GERMINO, Gabriel Henrique; DE ALMEIDA SILVA, Marcelo. Adaptação das plantas ao déficit hídrico. **Acta iguazu**, v. 5, n. 4, p. 15-32, 2016.
- BONA, Elisa et al. Arbuscular mycorrhizal symbiosis affects the grain proteome of Zea mays: a field study. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 26439, 2016.
- BRAGA, Fabíola Mendes et al. Revisão: Crescimento de plantas C3 e C4 em resposta a diferentes concentrações de CO2. **Research, Society and Development**, 2021.
- BRITO, M. E.; FILHO, G. D. A.; WANDERLEY, J. A. C.; MELO, A. S.; COSTA, F. B.; FERREIRA, M. G. P. Growth, physiological and yield of sweet corn under water stress. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 5, p. 1244-1254, 2013.

CACEFO, V. **Estudo das vias de descarboxilação da fotossíntese C4 em cana-de-açúcar submetida ao déficit hídrico**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) -Universidade do Oeste Paulista – Unoeste, Presidente Prudente, SP, 2017.

CAVALCANTE, Ana Clara Rodrigues; CAVALLINI, Maria Cec2lia; LIMA, NRC de B. Estresse por déficit hídrico em plantas forrageiras. 2009.

CHIMUNGU, J. G.; LOADES, K. W.; LYNCH, J. P. Root anatomical phenes predict root penetration ability and biomechanical properties in maize (*Zea mays*). **Journal of Experimental Botany**, April 22, 2015 online.

CONAB - Companhia nacional de abastecimento. Perspectiva para agropecuária. Brasília, v.6. Safra 2024-25. Jun. 2024. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/perspectivas-para-a-agropecuaria>>. Acesso em: 26 setembro. 2024.

DA SILVA, Davi Francisco 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, p. e12310313172-e12310313172, 2021.

DEHIGASPITIYA, P.; MILHAM, P.; ASH, G. J.; ARUN-CHINNAPPA, K.; GAMAGE, D.; MARTIN, A.; NAGASAKA, S.; SENEWEERA, S. Exploring natural variation of photosynthesis in a site-specific manner: evolution, progress, and prospects. **Planta**. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-019-03223-1>.

DINIZ, Aline Franco. **Variabilidade climática e sua influência na produtividade do milho na microrregião de Feira de Santana (Bahia)**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ENSTONE D. E.; PETERSON, A.; MA, F. Root endodermis and exodermis: structure, function, and responses to the environment. **Journal of Plant Growth Regulation**, v.21, p.335–351, 2003.

EVERT, R.F. 2006. **Esau's Plant anatomy. meristems, cells, and tissues of the plant body - Their structure, function, and development**. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.

FURBANK, R. T.; HATCH, M. D. Mechanism of C4 photosynthesis: the size and composition of the inorganic carbon pool in bundle-sheath cells. **Plant Physiology**, Rockville, v. 85, n. 4, p. 958-964, dec. 1987.

GÓMEZ-LEYVA, Juan Florencio et al. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Associated with Maize (*Zea mays* L.) in the Formation and Stability of Aggregates in Two Types of Soil. **Microorganisms**, v. 11, n. 11, p. 2615, 2023.

GÓRSKA, Alicja Marta. **Understanding the transcriptional network regulating ZmPEPC1 gene expression**. 2018. Tese de Doutorado. Universidade NOVA de Lisboa (Portugal).

GUIMARÃES, P. S.; ROCHA, D. S.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z. Conteúdo de carboidrato foliar em híbridos de milho submetidos à restrição hídrica. **Evidencia**, Joacaba, v. 19, n. 2, p. 93-112, 2019.

JÚNIOR, G. A. G. et al. Absorption of nutrients by soursop seedlings in response to mycorrhizal inoculation and addition of organic compost. **Pesq. Agropec. Trop.**, [S.L], v. 48, n. 3, p. 287-294, jul./set. 2018.

JÚNIOR, Norberto Gomes Ribeiro et al. Anatomia e morfometria de raízes e folhas de *Urochloa brizantha* cv. Marandu em diferentes estádios de acometimento da síndrome da morte das pastagens. **Iheringia, Série Botânica.**, v. 72, n. 1, p. 127-132, 2017.

KRAUS, J., ARDUIN, M. **Manual básico de métodos em morfologia vegetal**. Edur, Seropédia, Rio de Janeiro, 1997.

LACERDA, Francisco HD et al. Fisiologia e crescimento do milho sob salinidade da água e aplicação de peróxido de hidrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, p. 771-779, 2022.

LI, Y., Sperry, J.S., Shao, M., 2009. **Hydraulic conductance and vulnerability to cavitation in corn (*Zea mays* L.) hybrids of differing drought resistance**. *Environ. Exp. Bot.* 66, 341–346.

MAGALHAES, Paulo C.; DURÃES, Frederico OM. Fisiologia da produção de milho. 2006.  
MATOS, Rafael Ribeiro de. **Contribuições da anatomia à taxonomia de *Tetrapterys* Cav. (*Malpighiaceae*) e gêneros segregados**. 2021.

MEDEIROS, J. D. 2006. **Pelos radiculares ramificados em *Miconia albicans* (Sw)**. *Triana (Melastomataceae)*. *INSULA* 35: 85-94.

MICKAN, Bede S. et al. Arbuscular mycorrhizal fungus-mediated interspecific nutritional competition of a pasture legume and grass under drought-stress. **Rhizosphere**, v. 18, p. 100349, 2021.

MORO, A. L.; BROETTO, F.; MORO, E. Relação hídrica e teor de clorofila em dois cultivares de arroz submetido à deficiência hídrica e adubação silicatada. **Irriga**, v. 20, n. 3, p. 570-586, 2015.

NIU, L.; YAN, Y.; HOU, P.; BAI, W.; ZHAO, R.; WANG, Y.; ZHOU, W. Influence of plastic film mulching and planting density on yield, leaf anatomy, and root characteristics of maize on the Loess Plateau. *The Crop Journal*, v. 8, n. 4, p. 548-564, 2020.

OSAKABE, Y.; OSAKABE, K.; SHINOZAKI, K.; TRAN, L. S. P. Response of plants to water stress. **Frontiers in plant science**, v. 5, p. 86, 2014.

PENA-VALDIVIA, C.B., Sánchez-Urdaneta, A.B., Trejo, C., Aguirre R., R.; Cárdenas S, E., 2005. **Root anatomy of drought sensitive and tolerant maize (*Zea mays* L.) seedlings under different water potentials**. *Cereal Res. Commun.* 33, 705–712.

PEREIRA, F. J.; CASTRO, E. M.; SOUZA, T. C.; MAGALHÃES, P. C. Evolução da anatomia radicular do milho “Saracura” em ciclos de seleção sucessivos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 1649 – 1656, 2008.

PEREIRA, Fabricio José et al. Evolução da anatomia radicular do milho 'Saracura' em ciclos de

seleção sucessivos. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 43, p. 1649-1656, 2008.

PIMENTEL, Carlos. A relação da planta com a água. **Seropédica: Edur**, v. 191, 2004.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. *Biologia Vegetal*. 8. ed. Rio de Janeiro: **Guanabara Koogan**, 2014.

REIS, A. R. dos; FURLANI JUNIOR, E.; BUZZETTI, S.; ANDREOTTI, M. Diagnóstico da exigência do cafeeiro em nitrogênio pela utilização do medidor portátil de clorofila. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 1, p. 163-171, 2006.

RISTIC, Z.; JENKS, M. A. Leaf cuticle and water loss in maize lines differing in dehydration avoidance. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v.159, p. 645– 651, Jan. 2002.

SALES, Luciane Reis et al. On farm inoculation of native arbuscular mycorrhizal fungi improves efficiency in increasing sugarcane productivity in the field. **Rhizosphere**, v. 22, p. 100539, 2022.

SANTOS, R. L. V.; BARBOSA, J. P. F.; SOUZA, W. C. L.; SILVA, L. E. B.; BRITO, D. R.; BRITO, D. B. Rendimento do híbrido de milho (*Zea mays* L.) AG 1051 sob diferentes populações de plantas em irrigação deficitária por gotejamento no Agreste Alagoano. **Revista da Universidade Estadual de Alagoas**, [S. l.], v. 12, n. 12, p. 1-9, 2020. DOI: 10.34032/ambientale.v12i1.190.Disponível em: <https://periodicosuneal.emnuvens.com.br/ambientale/article/view/190>. Acesso em: 10 nov. 2023.

SHIFERAW, B., Prasanna, B. M., Hellin, J., & Bänziger, M. (2011). Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security. **Food Security**, 3(3), 307-327.

SILVA, I. V. & Scatena, V. L. 2011. Anatomia de raízes de nove espécies de Bromeliaceae (Poales) da região amazônica do estado de Mato Grosso, Brasil. **Acta Botanica Brasilica** 25(3): 618-627. 2011.

SILVA, L. M.; ALQUINI, Y.; CAVALLET, V. J. Inter-relações entre a anatomia vegetal e a produção vegetal. **Acta Botanica Brasilica**, v. 19, p. 183-194, 2005.

SILVA, S.; SOUSA, A. C. P.; SILVA, C. S.; ARAÚJO, E. R.; SOARES, M. A. S.; TEODORO, I. Parâmetros produtivos do milho sob déficit hídrico em diferentes fases fenológicas no semiárido brasileiro. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 30-41, 2021.

SOUZA, T.C.; CASTRO, E.M.; PEREIRA, F.J.; PARENTONI, S.N; MAGALHÃES, P.C. Morphoanatomical characterization of root in recurrent selection cycles for flood tolerance of maize (*Zea mays* L.). **Plant Soil and Environmental**, v. 55, p.504–510, 2009.

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

TEDERSOO, Leho et al. High-level classification of the Fungi and a tool for evolutionary ecological analyses. **Springer**, v. 90, p. 135–159, jan. 2018.

THOLEN, D.; BOOM, C.; ZHU, X-G. Opinion: Prospects for improving photosynthesis by altering leaf anatomy. **Plant science**, v. 197, p. 92-101, 2012.

VALENTE, T. N. P.; LIMA, E. D. S.; HENRIQUES, L. T. D.; MACHADO, O. R. N.; GOMES, D. Í.; SAMPAIO, C. B.; COSTA, V. A. C. Anatomia de plantas forrageiras e a disponibilidade de nutrientes para ruminantes: revisão. **Veterinária e Zootecnia**, p. 347-358, 2011.

VAN FLEET, D. S. 1961. Histochemistry and function of the endodermis. **The Botanical Review** 27 (2): 165-220.

WAHAB, Abdul et al. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth, enhancing productivity, and potentially influencing ecosystems under abiotic and biotic stresses. **Plants**, v. 12, n. 17, p. 3102, 2023.

FELIPPE, Gil. **Grãos e Sementes: a vida encapsulada**. São Paulo: Senac, 2007.

BRITO, Vanessa Nascimento et al. Fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada na produção de mudas de paricá. **Ciência Florestal**, v. 27, p. 485-497, 2017.

RODRIGUES, Luciana Aparecida; BARROSO, Deborah Guerra; FIQUEIREDO, Fábio Afonso MM. Fungos micorrízicos arbusculares no crescimento e na nutrição mineral de mudas de *Tectona grandis* LF. **Ciência Florestal**, v. 28, p. 25-34, 2018.

DA SILVA, Ludmila Coutinho et al. SUPRESSÃO DE NEMATÓIDES-DAS-GALHAS DO CAFEIEIRO POR FUNGOS MICORRIZICOS ARBUSCULARES. **X Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, 2019.

DE MELO, Juliana Maria Medrado et al. Crescimento de meloeiro submetido ao estresse hídrico com e sem micorrização no vale do submédio São Francisco. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 2, p. 1261, 2017.

MONTE, Enrique; BETTIOL, Wagner; HERMOSA, Rosa. Trichoderma e seus mecanismos de ação para o controle de doenças de plantas. **Trichoderma: uso na agricultura**. Brasília: Embrapa, p. 181-199, 2019.

SILVA, Cristiane Figueira da et al. Fungos micorrízicos arbusculares: composição, comprimento de micélio extrarradicular e glomalina em áreas de Mata Atlântica, Rio de Janeiro. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 02, p. 419-430, 2016.

DE JESUS MENDONÇA, Johny et al. Crescimento e colonização micorrízica do tomateiro IPA06 inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em substrato orgânico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 3, p. 1-9, 2019.

DE JESUS, Bruno Arruda dos Santos et al. **Aplicação de Inoculante de Fungos Micorrízicos Arbusculares Autóctones em Crescimento de Milho (*Zea mays* L.)** Visando Capacitação de Agricultores Familiares. 2021.

DANELUZZI, Gabriel. O que são as plantas C4 e porque elas são tão produtivas? **Agroadvance**, 2024. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-plantas-c4-o-que-sao/>. Acesso em 23 jan. 2025.

DANTAS, Belchior Luiz et al. Diversidade de fungos micorrízicos arbusculares em pomar orgânico no semiárido cearense. **Ciência Rural**, v. 45, n. 8, p. 1480-1486, 2015.

DA SILVA SANTOS, Jennie Kélyn; SANTANA, Marcos Diones Ferreira; LARA, Túlio Silva. Responsividade de plantas de milho à inoculação com fungos micorrízicos arbusculares da rizosfera de ipê amarelo. **Revista Agroecossistemas**, v. 10, n. 1, p. 253-264, 2018.

MALFATTI, Aline de Liz Ronsani; DA CRUZ, Sonia Purin. Inoculação em soja com *Rhizophagus clarus* produzidos em sistema de cultivo em vaso e in vitro. **Scientia Agraria Paranaensis**, p. 244-250, 2019.

TURCHETTO, Ricardo et al. Fungos micorrízicos arbusculares no cultivo de trigo em solo contaminado com cobre. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 43, n. 4, p. 1579-1594, 2022.

PRADO, Karinne de Albuquerque Campos do et al. Fungos micorrizicos arbusculares como indicadores de recuperação de áreas degradadas no ecossistema caatinga: uma revisão integrativa. In: **mudanças climáticas e seus impactos socioambientais concepções, fundamentos, teorias e práticas mitigadoras**. Editora Científica Digital, 2023. p. 198-206.

RENNY, M., CRISTINA-ACOSTA, M., COFRÉ, N., DOMÍNGUEZ, L.S., BIDARTONDO, M.I. & SÉRSIC, A.N. (2017). Genetic diversity patterns of arbuscular mycorrhizal fungi associated with the mycoheterotroph *Arachnitis uniflora* Phil. (Corsiaceae). **Annals of Botany** 119: 1279–129.

JOBIM, K. ; LIMA, J. L. R. ; OLIVEIRA, N. V. L. ; GOTO, B. T. (2019). Qual a relevância das espécies esporocárpicas na taxonomia e sistemática de Glomeromycota?. In: Oliveira, L. A., Jesus, M. A., Jackisch Matsuura, A. B., Oliveira, J. G. S., Gasparotto, L., Lima-Neto, R. G., & Rocha, L. C. Eds. **Conhecimento, conservação e uso de fungos**. 224: 41- 52.

BONFIM, J.A., VASCONCELLOS, R.L., GUMIERE, T., MESCOLOTTI, D.L.C., OEHL, F. & NOGUEIRA-CARDOSO, E.J. (2016). Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in a Brazilian Atlantic Forest Toposequence. **Microbial Ecology** 71(1): 164–77.

MARINHO, F., OEHL, F., SILVA, I.R., COYNE, D., VERAS, J.S.N. & MAIA, L.C. (2019). High diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in natural and anthropized sites of a Brazilian tropical dry forest (Caatinga). **Fungal Ecology** 40: 82–91.

MELO, C.D., WALKER, C., FREITAS, H., MACHADO, A.C. & BORGES, P.A.V. (2020). Distribution of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in Terceira and São Miguel Islands (Azores). **Biodiversity Data Journal** 8: e49759

SHELDRAKE, M.; ROSENSTOCK, N.; REVILLINI, D.; OLSSON, P. A.; MANGAN, S.; SAYER, E. J.; ... & TANNER, E. V. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungal community composition is altered by long-term litter removal but not litter addition in a lowland tropical forest. **New Phytologist**, 214(1), 455-467

GALVÃO, João Carlos Cardoso et al. Sete décadas de evolução do sistema produtivo da cultura do milho. **Revista Ceres**, v. 61, p. 819-828, 2014.

MATZENAUER, Ronaldo; WESTPHALEN, Sérgio Luis; BERGAMASCHI, Homero. Relações entre a evapotranspiração do milho e as fórmulas de Penman e Thornthwaite. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 18, n. 11, p. 1207-1214, 1983.