



MATEUS VILELA PIRES

**CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS E FISIOLÓGICAS EM
GENÓTIPOS DE BATATA-DOCE E TRIGO SOB DÉFICIT
HÍDRICO**

**LAVRAS - MG
2024**

MATEUS VILELA PIRES

**CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS E FISIOLÓGICAS EM GENÓTIPOS DE
BATATA-DOCE E TRIGO SOB DÉFICIT HÍDRICO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Botânica Aplicada, área de concentração em Botânica Aplicada para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Evaristo Mauro De Castro
Orientador

Prof. Dr. Marcio Paulo Pereira
Coorientador

**LAVRAS - MG
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Pires, MATEUS VILELA.

Características estruturais e fisiológicas em genótipos de
batata-doce e trigo sob déficit hídrico / MATEUS VILELA Pires.
- 2024.

116 p. : il.

Orientador(a): Evaristo Mauro de Castro.

Coorientador(a): Marcio Paulo Pereira.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Ipomoea batatas [L] Lam. 2. Triticum aestivum L. 3.
anatomia da folha/raiz. I. de Castro, Evaristo Mauro. II. Pereira,
Marcio Paulo. III. Título.

MATEUS VILELA PIRES

**CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS E FISIOLÓGICAS EM GENÓTIPOS DE
BATATA-DOCE E TRIGO SOB DÉFICIT HÍDRICO**

**STRUCTURAL AND PHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS IN GENOTYPES OF
SWEET POTATO AND WHEAT UNDER WATER DEFICIT**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Botânica Aplicada, área de concentração em Botânica Aplicada para a obtenção do título de Doutor

APROVADO em 22 de março de 2024.
Prof. Dr. Evaristo Mauro De Castro – (UFLA)
Profa. Dra. Marinês Ferreira Pires Lira - (UFLA)
Prof. Dr. Thiago Corrêa de Souza - (UNIFAL)
Dr. Vinícius Politi Duarte - (UNIFAL)
Dr. Orivaldo Benedito da Silva – (UFLA)

**LAVRAS - MG
2024**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, iluminando e dando força, persistência e coragem para enfrentar os obstáculos da vida.

Agradeço a minha esposa, Marisa, sempre me apoiou a superar os desafios e perseguir meus objetivos.

Ao meu filho Francisco, reservo o amor maior de todos. É por ele que me levanto todos os dias, na certeza de ser uma pessoa melhor com uma missão na vida.

Agradeço aos meus pais, José e Nilza, pela confiança, dignidade e por sempre motivarem os meus estudos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Evaristo Mauro de Castro pelo amparo, confiança, amizade, paciência, ao seu carisma e à sua sabedoria, sou imensamente grato pela oportunidade de aprender com alguém tão respeitoso e dedicado como você. Seu apoio foi fundamental para minha conquista e sempre será lembrado com grande estima.

Aos professores do programa de pós graduação em botânica aplicada, que com empenho se dedicam à arte de ensinar com excelência.

Aos meus grandes companheiros e amigos de pesquisa Orivaldo, Bruno, Edilson, Yohanna, Joabe, Vinicius, Orlando, Isabela, Geovana, Thomaz, Max, Alessander e Márcio pelos ensinamentos, convivência, incrível trabalho em equipe e colaboração durante este projeto de pesquisa.

A Letícia do laboratório de anatomia vegetal do programa de Pós-Graduação em Botânica aplicada UFLA, seu profissionalismo, dedicação, habilidades e sua capacidade de lidar com os desafios do dia a dia do laboratório com calma e eficiência foram fundamentais para o progresso e sucesso dos nossos experimentos.

Aos membros da banca avaliadora agradeço sinceramente pelo tempo dedicado à revisão do meu trabalho e contribuições. Suas sugestões e insights foram extremamente úteis para aprimorar minha pesquisa e meu entendimento do assunto.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação em Botânica Aplicada pela oportunidade.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, agradeço pela concessão da bolsa de estudos e pelo auxílio no desenvolvimento do projeto.

RESUMO

O déficit hídrico afeta as características morfológicas, anatômicas, fisiológicas de diversas plantas, que podem ter um efeito prejudicial na produção agrônômica e econômica. Os esforços atuais estão focados no desenvolvimento, avaliação e estudo de novos genótipos de culturas com maior tolerância à seca para aumentar a produção mundial de alimentos. Portanto, o objetivo do presente estudo foi avaliar as características fisiológicas e morfoanatômicas de quatro genótipos de batata-doce e seis genótipos de trigo submetidos ao déficit hídrico, que contribuem na identificação da tolerância ou sensibilidade a seca. No experimento com batata-doce foram utilizados quatro genótipos (UFLA-464, UFLA-1432, UFLA-268 e UFLA-713) em duas épocas de plantio. A primeira época, com clima seco de outono/inverno, apresentou menores precipitações e umidade, enquanto a segunda época, na primavera/verão, foi mais chuvosa. Esses diferentes climas afetaram significativamente o crescimento das plantas. Os genótipos UFLA-464 e UFLA-1432 mostraram-se mais resistentes à seca devido a características que incluem alta eficiência de trocas gasosas, menor perda de água e adaptações anatômicas favoráveis. Já os genótipos UFLA-268 e UFLA-713 requerem mais água, não apresentando as mesmas adaptações à seca. No experimento com trigo, o estudo foi conduzido em casa de vegetação, utilizando um delineamento inteiramente casualizado com 12 tratamentos (duas condições hídricas e seis genótipos) em esquema fatorial (2x6), com cinco repetições e uma planta por vaso. Foram avaliados genótipos de trigo adaptados ao sequeiro (BRS 404 e MGS Brilhante) e à irrigação (BRS 264, Tbio Duque, Tbio Aton e ORS Feroz). Para todos os genótipos em estudo sob déficit hídrico de 30% da capacidade de campo, observou-se aumento na eficiência do uso da água e em características anatômicas, como densidade estomática, densidade de células epidérmicas, área do feixe vascular e área do floema. Essas características são cruciais para genótipos resistentes que evitam a desidratação, especialmente em cultivos com períodos curtos de déficit hídrico e capacidade de campo acima de 30%, pois ajudam a evitar o estresse hídrico sem comprometer o rendimento morfológico e fisiológico. No estudo da anatomia e a arquitetura das raízes de diferentes genótipos de trigo sob déficit hídrico (30% da capacidade de campo). O genótipo sequeiro BRS 404 mostrou melhor adaptação à seca por meio de modificações anatômicas e na arquitetura radicular. Já o genótipo sequeiro MGS Brilhante apresentou mudanças apenas nas características anatômicas. Ambos os genótipos demonstraram alta plasticidade fenotípica nas raízes. Conclui-se que BRS 404 e MGS Brilhante são mais resistentes à seca comparados aos genótipos irrigados BRS 264, Tbio Duque, Tbio Aton e ORS Feroz devido às suas modificações morfoanatômicas da raiz.

Palavras-chaves: *Ipomoea batatas* [L.] Lam.; *Triticum aestivum* L.; anatomia da folha/raiz; déficit hídrico.

ABSTRACT

The water deficit affects the morphological, anatomical, and physiological aspects of various plants, which can have a detrimental effect on agronomic and economic production. Current efforts are focused on the development, assessment, and study of new crop genotypes with higher drought tolerance to increase global food production. Therefore, the objective of this study was to evaluate the physiological and morphoanatomical characteristics of four sweet potato genotypes and six wheat genotypes subjected to water deficit, contributing to the identification of drought tolerance or sensitivity. In the sweet potato experiment, four genotypes (UFLA-464, UFLA-1432, UFLA-268, and UFLA-713) were used at two planting times. The first planting time, with a dry autumn/winter climate, had lower precipitation and humidity, while the second planting time, in spring/summer, was rainier. These different climates significantly affected plant growth. The genotypes UFLA-464 and UFLA-1432 showed greater drought resistance due to characteristics that include high gas exchange efficiency, lower water loss, and favorable anatomical adaptations. In contrast, the genotypes UFLA-268 and UFLA-713 require more water and do not exhibit the same drought adaptations. In the wheat experiment, the study was conducted in a greenhouse, using a completely randomized design with 12 treatments (two water conditions and six genotypes) in a factorial scheme (2x6), with five replications and one plant per pot. Wheat genotypes adapted to dry conditions (BRS 404 and MGS Brilhante) and irrigation (BRS 264, Tbio Duque, Tbio Aton, and ORS Feroz) were evaluated. For all genotypes studied under a 30% water deficit of field capacity, an increase in water use efficiency and anatomical characteristics such as stomatal density, epidermal cell density, vascular bundle area, and phloem area was observed. These characteristics are crucial for resistant genotypes that avoid dehydration, especially in crops with short periods of water deficit and field capacity above 30%, as they help to avoid water stress without compromising morphological and physiological yield. In the study of the anatomy and architecture of roots of different wheat genotypes under water deficit (30% of field capacity), the dry genotype BRS 404 showed better adaptation to drought through anatomical and root architectural modifications. The dry genotype MGS Brilhante showed changes only in anatomical characteristics. Both genotypes demonstrated high phenotypic plasticity in their roots. It is concluded that BRS 404 and MGS Brilhante are more drought-resistant compared to the irrigated genotypes BRS 264, Tbio Duque, Tbio Aton, and ORS Feroz due to their morphoanatomical modifications of the root.

Keywords: *Ipomoea batatas* [L.] Lam.; *Triticum aestivum* L.; leaf/root anatomy; water deficit.

INDICADORES DE IMPACTO

O estudo evidenciou um conjunto de características morfológicas, fisiológicas e anatômicas de quatro genótipos de batata-doce e seis genótipos de trigo submetidos ao déficit hídrico, visando identificar sua tolerância ou sensibilidade à seca. Os genótipos UFLA-464 e UFLA-1432 de batata-doce e os genótipos BRS 404 e MGS Brilhante de trigo apresentaram melhor às condições de seca. Portanto, estes resultados possuem impactos sociais, pois os genótipos são mais resistentes ao déficit hídrico, podendo aumentar a produção de batata-doce e trigo, essencial para a segurança alimentar, especialmente em áreas sujeitas à seca. Isso pode reduzir as perdas de safra e evitar a migração forçada de agricultores para áreas urbanas, melhorando a qualidade de vida e a estabilidade socioeconômica. Tecnicamente, o estudo reflete avanços em biotecnologia e práticas agrícolas para melhoramento genético, com genótipos mais resistentes à seca permitindo menor necessidade de irrigação e, conseqüentemente, redução de custos. Além disso, esses genótipos mais resistentes a seca podem aumentar o rendimento por hectare, melhorando a rentabilidade agrícola. Os impactos culturais incluem possíveis mudanças nas práticas agrícolas tradicionais devido à introdução de novos genótipos. No entanto, a difusão de conhecimento sobre técnicas e genótipos resistentes pode enriquecer o saber local e as práticas comunitárias. O estudo impacta diversas áreas da Política Nacional de Extensão, como meio ambiente, tecnologia, educação e comunicação. No meio ambiente, a utilização de genótipos mais tolerantes à seca pode ajudar na conservação dos recursos hídricos, como na diminuição da irrigação. Na tecnologia e produção, as informações obtidas podem ser aplicadas em programas de melhoramento genético. Em educação, os resultados podem ser usados para ensinar melhores práticas de manejo e seleção de cultivares. A comunicação dos resultados pode ocorrer por meio de publicações, workshops e plataformas digitais, beneficiando a comunidade científica e agricultores. Além disso, os genótipos estudados contribuem para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), promovendo práticas agrícolas sustentáveis, aumentando a produtividade e segurança alimentar, conservando recursos hídricos e naturais e ajudando na adaptação às mudanças climáticas. Isso também apoia a erradicação da pobreza e fomenta a inovação e colaboração internacional, destacando a importância e o impacto multidimensional do estudo para o desenvolvimento sustentável global. A pesquisa envolveu estudantes de graduação da iniciação científica, estudantes de pós-graduação em Botânica Aplicada e professores da UFLA do Setor de Botânica Aplicada e da Agricultura, incluindo aqueles do banco de germoplasma da UFLA e agricultores especialistas em batata-doce e trigo, colaborando para desenvolver e testar os genótipos da pesquisa.

IMPACT INDICATORS

The study highlighted a set of morphological, physiological and anatomical characteristics of four sweet potato genotypes and six wheat genotypes subjected to water deficit, with the aim of identifying their tolerance or sensitivity to drought. Sweet potato genotypes UFLA-464 and UFLA-1432 and wheat genotypes BRS 404 and MGS Brilhante performed better under drought conditions. Therefore, these results have social impacts, as the genotypes are more resistant to water deficit and could increase sweet potato and wheat production, which is essential for food security, especially in drought-prone areas. This could reduce crop losses and prevent the forced migration of farmers to urban areas, improving quality of life and socio-economic stability. Technologically, the study reflects advances in biotechnology and agricultural practices for genetic improvement, with more drought-resistant genotypes allowing for less need for irrigation and, consequently, a reduction in costs. In addition, these more drought-resistant genotypes can increase yields per hectare, improving agricultural profitability. Cultural impacts include possible changes to traditional farming practices due to the introduction of new genotypes. However, the dissemination of knowledge about techniques and resistant genotypes can enrich local knowledge and community practices. The study impacts several areas of the National Extension Policy, such as the environment, technology, education and communication. In the environment, the use of more drought-tolerant genotypes can help conserve water resources, such as reducing irrigation. In technology and production, the information obtained can be applied to genetic improvement programmes. In education, the results can be used to teach better management practices and the selection of cultivars. The results can be communicated through publications, workshops and digital platforms, benefiting the scientific community and farmers. In addition, the genotypes studied contribute to the Sustainable Development Goals (SDGs) by promoting sustainable agricultural practices, increasing productivity and food security, conserving water and natural resources and helping to adapt to climate change. This also supports poverty eradication and fosters innovation and international collaboration, highlighting the importance and multidimensional impact of the study for global sustainable development. The research involved undergraduate scientific initiation students, postgraduate students in Applied Botany and UFLA professors from the Applied Botany and Agriculture Sector, including those from the UFLA germplasm bank and farmers specializing in sweet potato and wheat, collaborating to develop and test the research genotypes.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	12
1. INTRODUÇÃO	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Mudanças climáticas e a escassez hídrica.....	16
2.2 Déficits hídricos e a influência nas características das plantas.....	17
2.3 Aspectos morfofisiológicos e a influência hídrica	18
2.3.1 Batata-doce.....	19
2.3.2 Trigo.....	21
2.4 Estratégias de sobrevivência de plantas sob déficit hídrico.....	22
REFERÊNCIAS.....	25
SEGUNDA PARTE: ARTIGOS	35
ARTIGO 1: CARACTERÍSTICAS FENOTÍPICAS RELACIONADAS À PRODUTIVIDADE DE GENÓTIPOS DE BATATA-DOCE SOB DIFERENTES ÉPOCAS DE PLANTIO	36
1 INTRODUÇÃO	38
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	40
3 RESULTADOS.....	43
4 DISCUSSÃO	54
5 CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS.....	58
ARTIGO 2: CARACTERÍSTICAS MORFOANATÔMICAS E FISIOLÓGICAS DE GENÓTIPOS DE TRIGO SOB DÉFICIT HÍDRICO	62
1 INTRODUÇÃO	64
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	65
3 RESULTADOS.....	70
4 DISCUSSÕES	89
5 CONCLUSÕES	93
REFERÊNCIAS.....	94
ARTIGO 3: CARACTERÍSTICAS MORFOANATÔMICAS DO SISTEMA RADICULAR DE GENÓTIPOS DE TRIGO SOB DÉFICIT HÍDRICO	98
1 INTRODUÇÃO	100
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	102

3	RESULTADOS.....	105
4	DISCUSSÕES.....	110
5	CONCLUSÕES.....	113
	REFERÊNCIAS.....	114

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO

O aumento dos níveis da temperatura global como resultado das alterações climáticas representa um desafio mundial. As mudanças climáticas afetam a crosta terrestre através de precipitações pouco frequentes e erráticas, temperaturas elevadas e expansão de áreas com déficit hídrico. As plantas cultivadas em ambientes naturais frequentemente enfrentam vários estresses ao mesmo tempo (Zahra et al., 2022). A temperatura média anual aumentou cerca de 1,0 °C a nível mundial desde 1881 (Allen et al., 2019). As temperaturas elevadas aumentam a evapotranspiração, induzindo simultaneamente a salinização do solo e condições de déficit hídrico para reduzir a produtividade das culturas (Demirel et al., 2020). Estas combinações de estresses induzem um conjunto único de respostas complexas a níveis de tecidos, metabólicos e moleculares, que diferem daquelas observadas em cenários de estresses individuais (Demirel et al., 2020). Em decorrência disso, a produção agrícola é altamente influenciada por fatores climáticos, podendo ser drasticamente afetado em um futuro próximo se não forem tomadas medidas para acomodar e reduzir os efeitos do estresse abiótico nas culturas. Assim, existe uma necessidade urgente de cultivar culturas que utilizem os recursos hídricos de forma mais eficaz (Sapakhova et al., 2023).

O déficit hídrico está associado a mudanças na anatomia e ultraestrutura das folhas para a maioria das espécies de plantas, afetando diversos processos bioquímicos e fisiológicos, como translocação, respiração, absorção de íons, fotossíntese, metabolismo de nutrientes e açúcares e fitohormônios (Rollins et al., 2013). Além disso, as alterações típicas incluem reduções na quantidade de estômatos, condutância estomática, alterações nas paredes celulares, endurecimento das folhas, enrolamento das folhas e a indução precoce da senescência (Sapakhova et al., 2023). A seca intensa causa a cessação da fotossíntese e distúrbios metabólicos, podendo levar à morte das plantas (Kapoor et al., 2020).

A batata-doce (*Ipomoea batatas*) é um alimento básico, com forragem e cultura hortícola cultivada em países tropicais (Jackson et al., 2012). É uma raiz vegetal da família Convolvulaceae é a principal cultura básica (Reddy et al., 2017). A batata-doce é uma planta herbácea liana com folhas alternadas e flores tubulares. Suas raízes são comestíveis e podem variar em forma e cor, dependendo da variedade e das condições ambientais. Esses tubérculos são geralmente longos e a cor da casca varia do branco ao roxo (Motsa et al., 2015). Devido ao seu alto conteúdo nutricional e ampla adequação a terrenos pobres, a batata-doce é uma cultura potencial para prevenir a escassez de alimentos e melhorar a segurança alimentar (Elameen et al., 2008). Entretanto, a salinidade, baixa temperatura e o déficit hídrico são os três principais

estressores ambientais que reduzem a produtividade da batata-doce em todo o mundo (Shao et al., 2014). A cultura é especialmente suscetível à falta de água durante o período de estabelecimento, inclusive durante o início das raízes. Ao mesmo tempo, uma vantagem da batata-doce é que ela é resistente à seca depois de enraizada. É por isso que o potencial de rendimento é superior ao de outras culturas populares cultivadas nos países em desenvolvimento (Sapakhova et al., 2023). Mas um período muito extenso de déficit hídrico na cultura limita o seu rendimento, resultando numa perda anual de 25% da colheita.

O trigo (*Triticum aestivum* L. e *Triticum turgidum* L.) é um alimento utilizado em todo o mundo, contribuindo enormemente para a segurança alimentar global. Entretanto, a produtividade do trigo está ameaçada pela incidência imprevisível de eventos climáticos agudos, como seca, calor, salinidade e CO₂ elevado (Porter et al., 2019). Estes fatores afetam negativamente a economia alimentar global e a qualidade do trigo. As alterações climáticas representam um grande desafio para fornecer de forma consistente o trigo de qualidade no futuro, devido à interação multifacetada entre o CO₂, as ondas de calor e os padrões de chuva. As fases reprodutivas iniciais podem ser prejudicadas, podendo afetar o desenvolvimento do grão e flutuações na composição final (Dolferus et al., 2011). Pensando nisso, vários estudos revelam as consequências dos estresses abióticos na qualidade do trigo (Kumar et al., 2019), avaliando a composição e a qualidade do grão de trigo durante as mudanças climáticas, abrangendo informações sobre os nutrientes dos grãos e a sua composição química sob déficit hídrico (Zahra et al., 2022).

Existem mecanismos conhecidos que reduzem os efeitos negativos do déficit hídrico nas plantas, como por exemplo, os mecanismos de prevenção e tolerância ao estresse. Evitar o estresse refere-se à capacidade de uma planta de sustentar o alto potencial hídrico de seus tecidos sob déficit hídrico. As plantas atingem esses níveis aumentando a absorção de água através de sistemas radiculares profundos ou reduzindo as perdas por transpiração através de folhas finas ou carnudas (Kapoor et al., 2020). Além disso, o melhoramento agrônômico tradicional é uma alternativa, com o intuito de melhorar as características genéticas do germoplasma, através de melhorias na tolerância/resistência das plantas a estresses abióticos/bióticos. Considerando a importância do impacto do estresse abiótico na agricultura global, e para garantir a segurança alimentar, novos programas de melhoramento começaram a ser desenvolvidos e implementados utilizando o conhecimento das respostas fisiológicas e anatômicas das plantas (Kapoor et al., 2020).

Apesar dos avanços na pesquisa, existe uma lacuna substancial de conhecimento na inter-relação entre as características anatômicas e morfofisiológicas dos genótipos de batata-

doce e trigo em nosso estudo com sua resposta ao rendimento em diferentes condições hídricas. Esta lacuna destaca a necessidade de investigações que aprofundem nossa compreensão dessas complexas relações, fornecendo informações valiosas para orientar estratégias de cultivo e a utilização de genótipos com potencial genético em condições de crescimento muitas vezes com condições climáticas desfavoráveis. Preencher esta lacuna é essencial para avançar no conhecimento e aplicação prática, promovendo uma produção mais eficiente e sustentável da batata-doce e do trigo. A hipótese deste estudo é que existem variações significativas nas características anatômicas, morfofisiológicas presentes em genótipos e que estas características podem contribuir para a seleção de genótipos mais adaptados as condições de baixas precipitações. Portanto, para obter cultivares de trigo e batata-doce resistentes ao déficit hídrico, é necessário avaliar e compreender suas respostas das características anatômicas e morfofisiológicas, como ferramentas para observar se os genótipos em estudo apresentam alguns parâmetros de desenvolvimento de resistência ao déficit hídrico.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Mudanças climáticas e a escassez hídrica

As mudanças climáticas são observadas e previstas em todo o mundo, sendo consideradas significativas no século XXI. Seus efeitos trazem desafios complexos intergovernamentais para a população contemporânea. Grande parte da preocupação mundial é relacionada às questões ecológicas, ambientais, sociopolíticas e socioeconômicas (Feliciano et al., 2022). As alterações climáticas são caracterizadas com base nas tendências abrangentes de temperatura e precipitação em longo prazo e em outros componentes, como a pressão e o nível de humidade no ambiente. Além disso, os padrões climáticos irregulares, o recuo das camadas de gelo globais e a correspondente elevação do nível do mar estão entre os efeitos internacionais e nacionais mais conhecidos das alterações climáticas (Michel et al., 2021; Murshed e Dao, 2020). As atividades antropogênicas são atualmente consideradas as maiores responsáveis pelas mudanças climáticas (Murshed et al., 2022). Além da revolução industrial, outras atividades antrópicas incluem operações agrícolas excessivas, que envolvem ainda o alto uso da mecanização baseada em combustíveis, queima de resíduos agrícolas, queima de combustíveis fósseis, desmatamento, setores de transporte nacional e doméstico, etc (Huang et al., 2016). Consequentemente, estas atividades antropogênicas levam a catástrofes climáticas, danificando as infraestruturas locais e globais, a saúde humana e a produtividade total (Ishikawa-Ishiwata e Furuya, 2022). Outra consequência das mudanças climáticas está relacionada às temperaturas elevadas em vários locais do mundo (Schuurmans, 2021).

A escassez de água é um problema recorrente em alguns países, levando a consequências ambientais e econômicas que serão agravadas no futuro devido às alterações climáticas. A baixa disponibilidade hídrica agrava em grandes problemas na agricultura mundial, e dessa forma, a habilidade das plantas em resistir ao déficit hídrico é de suma importância para o desenvolvimento do agronegócio (Shao et al., 2008). Em diversas regiões o ciclo de desenvolvimento de determinadas espécies coincide com os períodos em que ocorre o déficit hídrico, afetando o desenvolvimento das plantas. Estima-se que na região tropical, 95% do cultivo sejam realizados em áreas propensas à deficiência hídrica, ocasionando declínio de produção de 10% a 50%, dependendo do estágio fenológico ao qual a cultura se encontra (Mohammadkhani e Heidari, 2008). As mudanças climáticas ocasionam problemas relacionados à escassez de água, sendo um fenômeno global que reflete diretamente na necessidade de aprimoramento de novas práticas de gerenciamento dos recursos hídricos e estratégias para enfrentar o déficit hídrico na agricultura.

Devido ao aumento das temperaturas impulsionado pelas mudanças climáticas, a disponibilidade de água está sendo afetada em todo o mundo, ocasionada pelo aumento da evapotranspiração e, portanto, às mudanças na precipitação e nos fluxos dos rios. Essas alterações afetam a capacidade dos diferentes setores econômicos de acessar água. Simultaneamente, espera-se que a procura de água aumente devido ao crescimento populacional que irá desencadear uma maior utilização em todos os setores. Além disso, espera-se que o uso da água na agricultura seja intensificado para satisfazer o aumento da procura alimentar (Hristov et al., 2021).

2.2 Déficit hídricos e a influência nas características das plantas

As principais condições abióticas que restringem o crescimento das plantas são os estresses causados pelas baixas temperaturas ideais e déficits hídricos, que ocorrem naturalmente no mesmo período (Jumrani e Bhatia, 2017). A combinação de baixa disponibilidade de água no solo, duração das horas de luz por dia (fotoperíodo) e temperatura (Freitas et al. 2010) podem afetar fortemente os processos fisiológicos e parâmetros morfológicos das plantas (Manavalan et al., 2009).

As perdas devido ao estresse podem variar de 50% a 80%, dependendo do período e do tipo de espécie vegetal (Christensen e Christensen, 2007). O déficit hídrico afeta o potencial produtivo, restringe o desempenho normal e altera as características fisiológicas e morfológicas das plantas (Zhao et al., 2007). O crescimento das plantas induzido pelo déficit hídrico foi estudado por outros pesquisadores em cultivares de trigo (Rampino et al., 2006), cevada (Khan e Bano, 2018), arroz e milho (Lafitte et al., 2006). A umidade e a biomassa vegetal são fatores de crescimento comuns afetados pelo déficit hídrico nessas plantas (Kamara et al., 2009). Além disso, como os nutrientes do solo são transferidos para as raízes através da água, o déficit hídrico pode impactar negativamente a absorção e translocação de nutrientes. O déficit hídrico na fase reprodutiva das culturas leva à redução da fotossíntese, bem como da área foliar e da produção de biomassa. Embora as plantas possam se recuperar do estresse até certo ponto, há graves perdas de rendimento (Jumrani et al., 2017).

Características dependentes do genótipo podem minimizar os efeitos do déficit hídrico em cultivares com hábitos de crescimento determinados e indeterminados, mantendo elevados teores relativos de água nas folhas (Silva et al., 2018). Porém, na presença desse estresse, as plantas promovem o fechamento estomático, interrompendo o fluxo de CO₂ e de água através da transpiração e limitando a assimilação e disponibilidade de CO₂ no mesófilo foliar, responsável pelo equilíbrio hídrico (Silva et al., 2015). Consequentemente, o déficit hídrico

reduz a absorção de nutrientes e o fluxo de massa de nutrientes solúveis em água, por exemplo, cálcio, nitrato, sulfato, silício e magnésio (Atouei et al., 2019). O déficit hídrico aumenta a formação de radicais livres que danificam o sistema de defesa das plantas, resultando em um aumento de espécies reativas de oxigênio, como radicais superóxido (O_2^-), hidroxila radical (OH) e peróxido de hidrogênio, que induzem ao estresse oxidativo, podendo causar danos aos tecidos, corrosão de membranas, proteínas e ácidos nucleicos, ocasionando na peroxidação lipídica (Farooq et al., 2014). As plantas têm um sistema defensivo antioxidante que evita que as membranas celulares e o DNA sofram danos oxidativos induzidos por espécies reativas de oxigênio, convertendo em formas não tóxicas, como água e oxigênio (Nasim et al., 2018).

A seca diminui o suprimento de dióxido de carbono para a fotossíntese, o que leva produção de espécies reativas de oxigênio a partir de elétrons mal orientados (Gaffney et al., 2015).

2.3 Aspectos morfofisiológicos e a influência hídrica

O déficit hídrico tem um impacto negativo no comprimento dos brotos e na massa fresca. Em feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), entretanto, houve uma queda considerável no peso seco da parte aérea (Widuri et al., 2018). Da mesma forma, observou-se que o comprimento das mudas de milho (*Zea mays* L.) foi drasticamente reduzido sob déficit hídrico. A escassez de água afeta tremendamente o peso seco das culturas de milho (Bocchini et al., 2018). Portanto, a planta precisa de um sistema radicular bem desenvolvido que se fixe e colete água e nutrientes de seu ambiente (Begum et al., 2019).

O déficit hídrico influencia os componentes internos da planta relacionados à altura (Lei et al., 2021). A perda de altura pode estar relacionada à diminuição do crescimento celular, uma alta taxa de abscisão foliar durante períodos de seca (Elnaggar et al., 2018). As condições de déficit hídrico reduziram consideravelmente o número de folhas em milho (*Zea mays* L.) (Ahmad et al., 2019). O estudo de Damalas (2019) mostrou que as folhas de manjerição (*Ocimum basilicum*) são significativamente afetadas pelo déficit hídrico, sendo mais críticas nos brotos e nas raízes, afetando o crescimento da planta, porque as folhas são responsáveis pela fotossíntese e contêm pigmentos fotossintéticos. Os regimes de seca reduzem a área foliar e a biomassa total das plantas (Kumar et al., 2021); causando limitação no crescimento das folhas e afetando o processo fotossintético. Estudos relataram que a área foliar diminui significativamente sob condições de déficit hídrico em muitas culturas, incluindo trigo (*Triticum aestivum* L.) e arroz (*Oryza sativa* L.) (Naz; Perveen, 2021; Kumar et al., 2021). A perda de água pela epiderme superior da folha resulta na redução do potencial de

pressão da folha, levando ao seu enrolamento. O aumento da interceptação da luz incidente e o aumento da taxa de transpiração beneficiam esse fenômeno. Sob regimes de déficit hídrico, a área foliar e o enrolamento das folhas foram dramaticamente aumentados nas folhas da cultura do milho (*Zea mays L.*) (Cai et al., 2020).

2.3.1 Batata-doce

A espécie *Ipomoea batatas* (L.) Lam., conhecida pelo nome popular de “batata-doce”, é amplamente cultivada no Brasil. No cenário de produção global, a China é o maior produtor de batata-doce, produzindo aproximadamente 51,9 milhões de toneladas em 2019 (FAO, 2020). O Brasil colheu 805,4 mil toneladas em no mesmo período, sendo o estado de São Paulo o segundo maior produtor com cerca de 140 mil toneladas (IBGE, 2021). A batata-doce possui uma cultura rústica que apresenta adaptabilidade para condições climáticas diversas (Filho, 2022). Portanto, pode ser cultivada em todas as regiões do Brasil, devido ao seu cultivo relativamente simples e de baixo custo (Cardoso et al., 2005). Além disso, são de fácil adaptação e toleram a ausência de água (Chen et al., 2018).

A batata-doce, pertencente à família Convolvulaceae, é uma planta herbácea eudicotiledônea. Suas características botânicas incluem caule rasteiro, folhas simples de aspecto membranáceo e lobadas, flores em forma de campânula, com coloração variando entre tons de rosa e branco-violáceo, e raízes tuberosas ricas em amido. Essas raízes são classificadas em variedades de acordo com suas cores, que podem ser brancas, creme, amarelas, laranjas, vermelho-púrpuras e roxas (Silva et al., 2008).

A batata-doce é uma cultura altamente versátil, encontrando-se frequentemente em uma ampla faixa geográfica, que vai das latitudes de 42° N até 35° S e altitudes que variam do nível do mar até 3000 m. Sua adaptação é notável, especialmente em climas tropicais, onde demonstra um desempenho superior em relação a culturas como milho, trigo, arroz e sorgo. Estudos, como o de Silveira (2007), apontam que a batata-doce é uma das culturas mais eficientes em termos de produção de energia líquida por unidade de área e tempo. É um cultivo que exige pouco manejo de fertilidade, capaz de desenvolver-se em condições adversas, trazendo uma solução de baixo custo e nutritiva para países em desenvolvimento. Essa raiz tuberosa pode apresentar diferentes compostos bioativos, como carotenóides, antocianinas, fenólicos e flavonoides (Pilon et al., 2021). Além disso, as raízes tuberosas possuem alto teor de amido, alta produtividade, com rusticidade e variabilidade genética (Silveira, 2008).

Os elementos meteorológicos como a disponibilidade hídrica e temperaturas adequadas são importantes para o bom desempenho da batata-doce. Em relação à temperatura ideal para o

seu cultivo, estudos apontam que a faixa ótima para o crescimento está no intervalo de 25°C a 30°C, temperaturas inferiores a 15°C e superiores a 35°C podem causar diminuição na produtividade da cultura (Villordon et al., 2009).

A seca afeta a estrutura da batata-doce não apenas nos níveis tecidual e celular, mas também no nível subcelular. As diferentes condições ambientais influenciam o crescimento, o rendimento e a qualidade nutricional da batata-doce (Mgcibelo, 2014). Por meio de um experimento de déficit hídrico, o estudo de Mgcibelo (2014) descobriu que o estresse por deficiência hídrica não afeta os tubérculos de batata-doce. Além disso, a pesquisa enfatizou que a batata-doce é resistente à seca e é capaz de aumentar seu nível de metabólitos secundários (por exemplo, aminoácidos e β -caroteno) sob déficit hídrico como forma de proteção. Esses metabólitos são úteis para os humanos, pois os fitoquímicos conduzem a um estilo de vida saudável (Yadav et al., 2021). Embora a batata-doce seja uma cultura resistente à seca, ela é sensível à essa condição, especialmente nos estágios iniciais de crescimento (Mgcibelo, 2014). Delazari et al. (2018) mostraram que o crescimento da batata-doce é severamente atrofiado em condições de seca, o que afeta o seu rendimento. Gouveia et al., (2019), avaliaram as respostas fisiológicas de amostras de batata-doce a condições de escassez de água e as amostras que tiveram a eficiência no uso da água melhorado foram consideradas as mais resistentes à seca.

As amostras de batata-doce apresentam as melhores respostas fisiológicas e bioquímicas ao tratamento do déficit hídrico, mostrando, em particular, uma maior proporção de partes da planta acima do solo e abaixo do solo (raiz/parte aérea), menor perda total de biomassa e menor estresse (Liu et al., 2023). Gouveia et al. (2019) estudou amostras de batata-doce, mostrando uma boa resposta fenotípica, incluindo eficiência hídrica e eficiência de nitrogênio para crescimento e funções vitais, bem como maior teor mineral de raiz, valores de índice de teor de clorofila e teor de nitrogênio na parte aérea. Além disso, todas as amostras reduziram a sua biomassa em 55,4%, mostrando assim um comportamento de evitação da seca sob condições de estresse. Portanto, foi demonstrado que a seca reduz o tamanho da batata-doce (relação raiz/parte aérea) como resultado do investimento no desenvolvimento da parte aérea.

Rahmawati et al. (2020) descobriu que as variedades de batata-doce de polpa alaranjada diferiam significativamente no peso dos tubérculos, mas a quantidade de tubérculos, o teor de betacaroteno, o teor de amido e o teor de umidade não diferiram significativamente. Além disso, a quantidade, o peso médio, o teor de betacaroteno e o teor de amido e água dos tubérculos não foram significativamente afetados pelo déficit hídrico. De acordo com Laurie et al. (2022), as variedades de polpa alaranjada têm maiores concentrações de Mg, Fe, Zn, Mn, Ca e fibra alimentar, enquanto variedades com polpa cremosa tendem a ter maiores concentrações de

amido e carboidratos. Os metabólitos secundários sintetizados ou ativados sob estressores abióticos são indicadores úteis para a seleção do germoplasma da batata-doce durante o melhoramento (Mgcibelo, 2014).

2.3.2 Trigo

O Brasil é o décimo sexto produtor, sétimo importador e décimo primeiro consumidor mundial de trigo. A produção brasileira de trigo em 2021 foi de 7,7 milhões de toneladas, cerca de dois terços do consumo nacional (66,2%), cuja média gira em torno de 11,6 milhões/ano. Em 2020, a maior produção veio da região Sul, no Paraná com 3,09 milhões de toneladas. Já em 2021, a produção deste estado foi de 3,16 milhões de toneladas, mas o estado do Rio Grande do Sul ganhou destaque, com uma produção de 3,55 milhões. Os dois estados somam 86% da produção nacional. Em 2022 a produção brasileira de trigo para a safra foi de 9,320 milhões de toneladas (CONAB, 2022). Apesar do amplo cultivo de trigo no sul do Brasil, existem problemáticas relacionadas à cultura, como a incidência de doenças e o baixo investimento de insumos para a sua produção (Rüdel et al., 2021). As doenças geralmente estão relacionadas ao clima, podendo ocasionar perdas de até 79%, dependendo da cultivar e sistema de manejo adotado (Benin et al., 2017). Já o baixo investimento se deve à alta sensibilidade das lavouras às variações climáticas, que resultam em variações ambientais, as quais refletem em redução da produtividade das lavouras devido aos eventos meteorológicos de estiagem ou excesso de chuvas (CONAB, 2017).

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é uma monocotiledônea representante da família Poaceae, rico em proteínas, carboidratos e minerais (Silva, 2017). O grão de trigo (fruto seco do tipo cariopse) é pequeno (6 a 7 mm), seco e indeiscente (não se abre naturalmente quando maduro). É um alimento básico em todo o mundo, sendo de suma importância na dieta diária, além de ser a fonte de carboidratos de milhões de pessoas (Litoriya et al., 2018). É amplamente cultivado no Brasil, devido ao desenvolvimento de cultivares de alto rendimento, que favorecem o alto consumo mercantil de alimentos com qualidade industrial superior e alto teor nutricional (Battenfield et al. 2016). É um cereal de grande relevância para o país, sendo transformado em farinha.

A folha de trigo é composta por bainha, lâmina, lígula com um par de aurículas pilosas. No limbo foliar podemos destacar os principais tecidos, como a epiderme, mesofilo homogêneo (parênquima clorofiliano) feixes vasculares (Rodrigues et al., 2015). As folhas costumam se adaptar as variações ambientais, principalmente as condições hídricas, densidade de semeadura e sombreamento (Batista, 2023).

O déficit hídrico durante o estágio de enchimento de grãos acelera a senescência das folhas de trigo e reduz significativamente o rendimento (Liu et al., 2016). Richards (1983) observou que em casos de limitação de água a planta tende a reduzir sua área foliar, resultando em melhora no potencial de produtividade e na eficiência do uso da água, alguns estádios fenológicos são mais sensíveis a essa condição, apresentando redução no rendimento quando ocorre falta de água nos estádios entre o florescimento e grão leitoso.

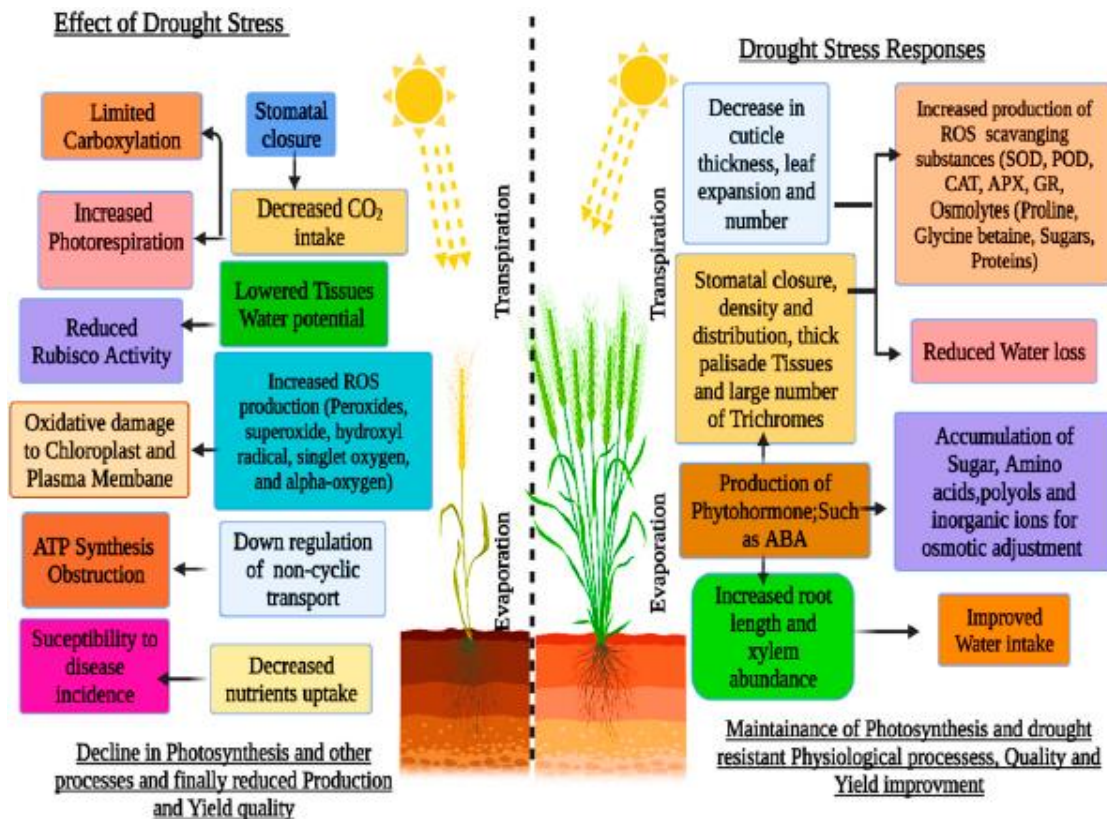
A seleção de genótipos de trigo é um processo relacionado à criação de novas variedades com combinações ótimas de propriedades biológicas e econômicas valiosas, bem como interações ambientais para melhorar sua resistência ao estresse osmótico (Lotfi et al., 2022). Além disso, o melhoramento da tolerância ao déficit hídrico em plantas cultivadas é uma adição administrável e útil à engenharia genética para aumentar o potencial das culturas (Furbank et al., 2020). O trigo é a principal cultura em todo o mundo e é frequentemente exposto a um déficit hídrico, especialmente durante a germinação das sementes e a fase de estabelecimento da cultura no início do outono (Kartseva et al., 2021). Portanto, a avaliação da tolerância à seca na fase de muda é a característica mais importante para a triagem da tolerância à seca no melhoramento do trigo, uma vez que afeta todas as fases subsequentes e, em última análise, o rendimento de grãos (Hameed et al., 2010).

2.4 Estratégias de sobrevivência de plantas sob déficit hídrico

O déficit hídrico afeta os aspectos morfológicos, anatômicos, fisiológicos e bioquímicos de diversas plantas. Ao mesmo tempo, induz uma série de alterações estruturais, fisiológicas e bioquímicas, que podem ter um efeito prejudicial na produção agrônoma e econômica. Em geral, as plantas se defendem da seca principalmente por meio de mecanismos de resistência a seca, incluindo a evitação e tolerância à seca. O mecanismo de evitação à seca mantém a pressão do turgor por meio da penetração profunda das raízes no solo, minimiza a perda de água pela transpiração estomática e conserva um maior potencial hídrico nas plantas, mesmo em situações de escassez de água no solo (Savyata Kandel, 2021). O mecanismo de tolerância à seca protege as plantas ao realizar ajustes osmóticos que preservam o turgor, resultando em maior elasticidade e redução do tamanho celular (Savyata Kandel, 2021).

O efeito do déficit hídrico nas plantas sensíveis a seca ocorre à redução da produção de raízes, ramificação, o índice de área foliar, a altura e comprimento do caule, o fechamento dos estômatos, o tamanho das folhas e a fotossíntese. Além disso, causa estresse oxidativo, que resulta na criação de espécies reativas de oxigênio prejudiciais às plantas (Sapakhova et al., 2023). Na Figura 1, são apresentados exemplos de plantas sensíveis e tolerantes de trigo.

Figura 1. Efeitos do déficit hídrico em culturas sensíveis e tolerantes de trigo (*Triticum aestivum* L.)



Fonte: Wahab et al. (2022)

Nas plantas que possuem tolerância à seca, várias características estão associadas a mecanismos morfológicos específicos para enfrentar a escassez de água. Por exemplo, a profundidade da disseminação das raízes no solo, a presença de cera nas folhas e a densidade de estruturas como tricomas e câmaras subestomáticas são características morfológicas cruciais que minimizam a perda de água por transpiração. Essas adaptações auxiliam as plantas na manutenção de um potencial hídrico mais elevado e na proteção contra a seca por períodos prolongados (Kvgk; Rao, 2019). O déficit hídrico altera a arquitetura e a morfologia das raízes das plantas agrícolas. O crescimento das raízes aumenta em tamanho e extensão à medida que as plantas buscam ativamente por água e minerais, enquanto as partes acima do solo mostram um crescimento limitado sob condições de déficit hídrico, resultando em uma maior proporção de razão raiz/parte aérea (Ahmad et al., 2018). O déficit hídrico também induz a senescência precoce das folhas de trigo. A capacidade das plantas de permanecerem ativas fotossinteticamente ou de resistirem à senescência precoce das folhas é considerada um importante mecanismo de defesa (De Simone et al., 2014).

Funções fisiológicas, como o ajuste osmótico, o fechamento dos estômatos, a integridade da membrana, ajudam a manter um maior potencial hídrico e promovem a tolerância à seca (Lambin et al., 2001). O ajuste osmótico gera diversos tipos de solutos orgânicos que contribuem para a desintoxicação de ROS, estabilização de membranas, além de estruturas enzimáticas e proteicas, auxiliando nos mecanismos de resistência à seca (Blum, 2017).

Para melhorar sua resistência à seca, as plantas realizam o ajuste osmótico, acumulando vários solutos orgânicos e inorgânicos, mantendo o turgor celular, o que possibilita a expansão, crescimento e desenvolvimento celular sob condições adversas (Aroca, 2012). Isso permite a fixação de CO₂ através dos estômatos, resultando no acúmulo de osmólitos. A gestão da desidratação e a integridade das membranas celulares, facilitadas pelo acúmulo de osmólitos, aumentam a resistência do trigo ao déficit hídrico (Ali et al., 2020).

A seleção e o melhoramento de genótipos adaptados a um determinado ambiente podem ser realizados com equipamentos adequados e através da utilização de indicadores de seleção relacionados à tolerância à deficiência hídrica. A criação de variedades tolerantes à seca é uma estratégia de manejo genético de baixo custo que pode ser adequada para pequenas propriedades (Andrade et al., 2016).

A fim de desenvolver um método de seleção eficaz para avaliar a tolerância à deficiência de água, condutância estomática, área foliar, teor de clorofila, potencial hídrico foliar, teor de prolina livre e eficiência no uso da água devem ser considerados o início do estágio de crescimento (Sapakhova et al., 2023). Vários estudos avaliaram esses parâmetros em diversas culturas, como beterraba (Monti et al., 2006), batata (Deblonde e Ledent, 2001), algodão (Brito et al., 2011) e trigo (Akhter et al., 2008). Essas avaliações economizam tempo e dinheiro ao selecionar um genótipo candidato. Estes indicadores devem ser utilizados individualmente ou em combinação para desenvolver métodos adequados para a seleção e melhoramento de genótipos.

REFERÊNCIAS

- ABDELKADER, M.A.; EL-GABRY, Y.A.G.; SAYED, A.N.; SHAHIN, M.G.; DARWISH, H.A.; ABOUKOTA, M.E.; HASHEM, F.A.E.; ABD-ELRAHMAN, S.H. (2022). **Evaluation of physio-biochemical criteria in maize inbred lines and their F1 hybrids grown under water-deficit conditions.** *Ann. Agric. Sci.*, 67, 220–231. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2022.12.002>.
- AHMAD, S.; KAMRAN, M.; DING, R.; MENG, X.; WANG, H.; AHMAD, I.; FAHAD, S.; HAN, Q. (2019). **Exogenous Melatonin Confers Drought Stress by Promoting Plant Growth, Photosynthetic Capacity and Antioxidant Defense System of Maize Seedlings.** *PeerJ*, e7793. <https://doi.org/10.7717/peerj.7793>.
- AHMAD, Z., WARAICH, E. A., AKHTAR, S., ANJUM, S., AHMAD, T., MAHBOOB, W., HAFEEZ, O. B. A., TAPERA, T., LABUSCHAGNE, M., RIZWAN, M. (2018). **Physiological responses of wheat to drought stress and its mitigation approaches.** *Acta Physiologiae Plantarum*, 40(4), 80. <https://doi.org/10.1007/s11738-018-2651-6>.
- AKHTER, J.; SABIR, S.A.; LATEEF, Z.; YASEEN, M.; HAQ, M.A. (2008). **Relationships between carbon isotope discrimination and grain yield, water-use efficiency and growth parameters in wheat (*Triticum aestivum* L.) under different water regimes.** *Pak. J. Bot.*, 40, 1441–1454.
- ALI, M., GUL, A., HASAN, H., GUL, S., FAREED, A., NADEEM, M., SIDDIQUE, R., JAN, S. U., & JAMIL, M. (2020). **Cellular mechanisms of drought tolerance in wheat.** In *Climate Change and Food Security with Emphasis on Wheat* (pp. 155–167). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819527-7.00009-1>.
- ALLEN M, ANTWI-AGYEI P, ARAGON-DURAND F, BABIKER M, BERTOLDI P, BIND M, BROWN S, BUCKERIDGE M, CAMILLONI I AND CARTWRIGHT A. (2019). **Technical summary: global warming of 1.5 °C. an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.** <http://pure.iiasa.ac.at/15716>.
- ANDRADE, M.I.; NAICO, A.; RICARDO, J.; EYZAGUIRRE, R.; MAKUNDE, G.S.; ORTIZ, R.; GRÜNEBERG, W.J. (2016). **Genotype × environment interaction and selection for drought adaptation in sweetpotato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam.) in Mozambique.** *Euphytica*, 209, 261–280. <https://doi.org/10.1007/s10681-016-1684-4>.
- AROCA R. (2012). **Plant Responses to Drought Stress** (R. Aroca, Ed.). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0>.
- ATOUEI, M.T.; POURBABAEI, A.A.; SHORAFI, M. (2019). **Alleviation of Salinity Stress on Some Growth Parameters of Wheat by Exopolysaccharide-Producing Bacteria.** *Iran. J. Sci. Technol. Trans. A Sci.*, 43, 2725–2733. <https://doi.org/10.1007/s40995-019-00753-x>.
- BATISTA CV (2023). **Densidade de sementeira como fator modulador da produção, crescimento e anatomia foliar de cultivares de trigo tropical.** Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, 37p.

BATTENFIELD SD, GUZMÁN C, GAYNOR RC, SINGH RP, PENA RJ, DREISIGACKER S, FRITZ AK, POLAND JA (2016). **Genomic selection for processing and end-use quality traits in the CIMMYT spring bread wheat breeding program.** *The Plant Genome*, v. 9, n. 1, p. 1-12. <https://doi.org/10.3835/plantgenome2016.01.0005>.

BEGUM, N.; AHANGER, M.A.; SU, Y.; LEI, Y.; MUSTAFA, N.S.A.; AHMAD, P.; ZHANG, L. (2019). **Improved Drought Tolerance by AMF Inoculation in Maize (*Zea mays*) Involves Physiological and Biochemical Implications.** *Plants*, 8, 579. <https://doi.org/10.3390/plants8120579>.

BENIN G, STORCK L, MARCHIORO VS, BORNHOFEN E, WOYANN LG, TREVIZAN DM (2017). **Seleção ambiente-específica de genótipos para rendimento de grãos e responsividade à aplicação de fungicida em trigo.** *Revista Ceres*, v. 64, n° 2, p. 167-175, Viçosa. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201764020009>.

BHATTACHARYA, A. (2021). **Effect of Soil Water Deficit on Growth and Development of Plants: A Review.** *Soil Water Deficit Physiol. Issues Plants*, 2021, 393–488.

BLUM, A. (2017). **Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production.** *Plant, Cell & Environment*, 40(1), 4–10. <https://doi.org/10.1111/pce.12800>.

BOCCHINI, M.; D'AMATO, R.; CIANCALEONI, S.; FONTANELLA, M.C.; PALMERINI, C.A.; BEONE, G.M.; ONOFRI, A.; NEGRI, V.; MARCONI, G.; ALBERTINI, E.; et al. (2018). **Soil Selenium (Se) Biofortification Changes the Physiological, Biochemical and Epigenetic Responses to Water Stress in *Zea mays* L. by Inducing a Higher Drought Tolerance.** *Front. Plant Sci.*, 9, 389. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00389>.

BRITO, G.G.; SOFIATTI, V.; DE ANDRADE LIMA, M.M.; DE CARVALHO, L.P.; DA SILVA FILHO, J.L. (2011). **Physiological traits for drought phenotyping in cotton.** *Acta Sci. Agron.*, 33, 117–125. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i1.9839>.

CAI, F.; ZHANG, Y.; MI, N.; MING, H.; ZHANG, S.; ZHANG, H.; ZHAO, X. (2020). **Maize (*Zea mays* L.) Physiological Responses to Drought and Rewatering, and the Associations with Water Stress Degree.** *Agric. Water Manag.*, 241, 106379. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106379>.

CARDOSO, A.D. et al. (2005). **Avaliação de clones de batata-doce em Vitória da Conquista.** *Horticultura Brasileira*, v. 23, p. 911-914.

CHAUDHRY, S.; SIDHU, G.P.S. (2022). **Climate Change Regulated Abiotic Stress Mechanisms in Plants: A Comprehensive Review.** *Plant Cell Rep.*, 41, 1–31. <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02759-5>.

CHEN D, WANG S, YIN L, DENG X (2018). **How does silicon mediate plant water uptake and loss under water deficiency?.** *Frontiers in plant science*, v. 9, p. 281. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00281>.

CHRISTENSEN, J.H.; CHRISTENSEN, O.B. (2007). **A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century.** *Clim. Chang.*, 81, 7–30. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9210-7>.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). **Portal de Informações Agropecuárias.** 2022.

- DAMALAS, C.A. (2019). **Improving Drought Tolerance in Sweet Basil (*Ocimum basilicum*) with Salicylic Acid**. *Sci. Hortic.* (Amsterdam), 246, 360–365. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.005>.
- DE SIMONE, V., SOCCIO, M., BORRELLI, G. M., PASTORE, D., & TRONO, D. (2014). **Stay-green trait-antioxidant status interrelationship in durum wheat (*Triticum durum*) flag leaf during post-flowering**. *Journal of Plant Research*, 127(1), 159–171. <https://doi.org/10.1007/s10265-013-0584-0>.
- DEBLONDE, P.M.K.; LEDENT, J.F. (2001). **Effects of moderate drought conditions on green leaf number, stem height, leaf length and tuber yield of potato cultivars**. *Eur. J. Agron.*, 14, 31–41. 8, 157–163. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00081-2](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00081-2).
- DELAZARI, F.T.; ASSIS, I.R.; CABRERA, D.F.V.; FERREIRA, M.G.; DIAS, L.E.; RUEDA, A.; ZANUNCIO, J.C.; SILVA, D.J.H. (2018). **Morpho-physiological characteristics by sweet potato cultivars as function of irrigation depth**. *An. Acad. Bras. Cienc.*, 90, 3541–3549. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820170687>.
- DEMIREL U, MORRIS WL, DUCREUX LJ, YAVUZ C, ASIM A, TINDAS I et al., (2020). **Physiological, biochemical, and transcriptional responses to single and combined abiotic stress in stress-tolerant and stress-sensitive potato genotypes**. *Front Plant Sci* 11: 169. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00169>.
- DOLFERUS R, JI X AND RICHARDS RA. (2011). **Abiotic stress and control of grain number in cereals**. *Plant Sci* 181: 331–341. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.05.015>.
- ELAMEEN, A.; FJELLHEIM, S.; LARSEN, A.; ROGNLI, O.A.; SUNDHEIM, L.; MSOLLA, S.; MASUMBA, E.; MTUNDA, K.; KLEMSDAL, S.S. (2008). **Analysis of genetic diversity in a sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) germplasm collection from Tanzania as revealed by AFLP**. *Genet. Resour. Crop. Evol.*, 55, 397–408. <https://doi.org/10.1007/s10722-007-9247-0>.
- ELNAGGAR, A.; EL-KEBLAWY, A.; MOSA, K.A.; SOLIMAN, S. (2018). **Drought Tolerance during Germination Depends on Light and Temperature of Incubation in *Salsola Imbricata*, a Desert Shrub of Arabian Deserts**. *Flora Morphol. Distrib. Funct. Ecol. Plants*, 249, 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2018.11.001>.
- ERENSTEIN, O.; JALETA, M.; MOTTALEB, K.A.; SONDER, K.; DONOVAN, J.; BRAUN, H.J. (2022). **Global trends in wheat production, consumption and trade**. In *Wheat Improvement*; Reynolds, M.P., Braun, H.J., Eds.; Springer: Cham, Switzerland; pp. 47–66. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90673-3_4.
- FAO- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2020). *FAOSTAT, Crops*.
- FAROOQ, M.; HUSSAIN, M.; SIDDIQUE, K.H.M. (2014). **Drought Stress in Wheat during Flowering and Grain-filling Periods**. *Crit. Rev. Plant Sci.*, 33, 331–349. <https://doi.org/10.1080/07352689.2014.875291>.
- FELICIANO D, RECHA J, AMBAW G, MACSWEEN K, SOLOMON D, WOLLENBERG E (2022) **Assessment of agricultural emissions, climate change mitigation and adaptation practices in Ethiopia**. *Clim Policy* 1–18. <https://doi.org/10.1080/14693062.2022.2028597>.

- FILHO JBM, HERNANDEZ FBT, RODRIGUES LN (2022). **Demanda hídrica da batata-doce em diferentes épocas de plantio**. ACSA, Patos-PB, v.17, n.1, p. 40-46, 2022, ISSN: 1808-6845. <http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v17i1.1352>.
- FREITAS, C. A. S. D.; BEZERRA, F. M. L.; SILVA, A. R. A.; PEREIRA FILHO, J. V.; FEITOSA, D. R. C. (2010). **Comportamento de cultivares de mamona em níveis de irrigação por gotejamento em Pentecoste, CE**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, n. 10, p. 1059-1066. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010001000006>.
- FURBANK, R.T.; SHARWOOD, R.; ESTAVILLO, G.M.; SILVA-PEREZ, V.; CONDON, A.G. (2020). **Photons to food: Genetic improvement of cereal crop photosynthesis**. J. Exp. Bot., 71, 2226–2238. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa077>.
- GAFFNEY, J.; SCHUSSLER, J.; LÖFFLER, C.; CAI, W.; PASZKIEWICZ, S.; MESSINA, C.D.; GROETEKE, J.; KEASCHALL, J.; COOPER, M. (2015). **Industry-Scale Evaluation of Maize Hybrids Selected for Increased Yield in Drought-Stress Conditions of the US Corn Belt**. Crop. Sci., 55, 1608–1618. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.09.0654>.
- GOUVEIA, C.S.S.; GANANÇA, J.F.T.; DE NÓBREGA, H.G.M.; DE FREITAS, J.G.R.; LEBOT, V.; DE CARVALHO, M.A.A.P. (2019). **Drought avoidance and phenotypic flexibility of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) under water scarcity conditions**. Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj Napoca, 47, 1036–1046. <https://doi.org/10.15835/nbha47411633>.
- GUO, P.; BAUM, M.; GRANDO, S.; CECCARELLI, S.; BAI, G.; LI, R.; VON KORFF, M.; VARSHNEY, R.K.; GRANER, A.; VALKOUN, J. (2009). **Differentially expressed genes between drought-tolerant and drought-sensitive barley genotypes in response to drought stress during the reproductive stage**. J. Exp. Bot., 60, 3531–3544. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp194>.
- GUPTA, A.; RICO-MEDINA, A.; CAÑO-DELGADO, A.I. (2020). **The Physiology of Plant Responses to Drought**. Science, 368, 266–269. <https://doi.org/10.1126/science.aaz7614>.
- GUSTMAN ACR. (2022). **Caracterização fisiológica, morfológica e determinação do Índice de área foliar em linhagens de trigo**. Dissertação. Fitotecnia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
- HAMEED, A.; GOHER, M.; IQBAL, N. (2010). **Evaluation of seedling survivability and growth response as selection criteria for breeding drought tolerance in wheat**. Cereal Res. Commun., 38, 193–202. <https://doi.org/10.1556/CRC.38.2010.2.5>.
- HRISTOV J, BARREIRO-HURLE J, SALPUTRA G, BLANCO M, WITZKE P (2021). **Reuse of treated water in European agriculture: Potential to address water scarcity under climate change**. Agricultural Water Management, 251. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106872>.
- HUANG W, GAO Q-X, CAO G-L, MA Z-Y, ZHANG W-D, CHAO Q-C (2016). **Effect of urban symbiosis development in China on GHG emissions reduction**. Adv Clim Chang Res 7(4):247–252. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2016.12.003>.
- IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal – PAM** (2021).

- ISHIKAWA-ISHIWATA Y, FURUYA J (2022). **Economic evaluation and climate change adaptation measures for rice production in vietnam using a supply and demand model: special emphasis on the Mekong River Delta region in Vietnam.** In *Interlocal Adaptations to Climate Change in East and Southeast Asia* (pp. 45–53). Springer, Cham.
- ISTANBULI, T.; BAUM, M.; TOUCHAN, H.; HAMWIEH, A. (2020). **Evaluation of Morpho-Physiological Traits under Drought Stress Conditions in Barley (*Hordeum vulgare* L.).** *Photosynthetica*, 58, 1059–1067. <https://doi.org/10.32615/ps.2020.041>.
- JACKSON, D.M.; HARRISON, H.F.; RYAN-BOHAC, J.R. **Insect resistance in sweetpotato plant introduction accessions.** *J. Econ. Entomol.* 2012, 105, 651–658. <https://doi.org/10.1603/EC11307>.
- JUMRANI, K.; BHATIA, VS (2017). **Impact of combined stress of high temperature and water deficit on growth and seed yield of soybean.** *Physiology and Molecular Biology of Plants*, v. 24, n. 1, p. 37-50. <https://doi.org/10.1007/s12298-017-0480-5>.
- JUMRANI, K.; BHATIA, VS; PANDEY, GP (2017). **Impact of elevated temperatures on specific leaf weight, stomatal density, photosynthesis and chlorophyll fluorescence in soybean.** *Photosynthesis Research*, v. 131, n. 3, p. 333-35. <https://doi.org/10.1007/s11120-016-0326-y>.
- KAMARA, A.Y.; EKELEME, F.; CHIKOYE, D.; OMOIGUI, L.O. (2009). **Planting Date and Cultivar Effects on Grain Yield in Dryland Corn Production.** *Agron. J.*, 101, 91–98. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0090>.
- KAPOOR, D.; BHARDWAJ, S.; LANDI, M.; SHARMA, S.; RAMAKRISHNAN, M.; SHARMA, A. (2020). **The impact of drought in plant metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production.** *Appl. Sci.*, 10, 5692. <https://doi.org/10.3390/app10165692>.
- KARTSEVA, T.; DOBRIKOVA, A.; KOICHEVA, K.; ALEXANDROV, V.; GEORGIEV, G.; BRESTIĆ, M.; MISHEVA, S. (2021). **Optimal nitrogen supply ameliorates the performance of wheat seedlings under osmotic stress in genotype-specific manner.** *Plants* 2021, 10, 493. <https://doi.org/10.3390/plants10030493>.
- KHAN, N.; BANO, A. (2018). **Effects of exogenously applied salicylic acid and putrescine alone and in combination with rhizobacteria on the phytoremediation of heavy metals and chickpea growth in sandy soil.** *Int. J. Phytoremediat.*, 16, 405–414. <https://doi.org/10.1080/15226514.2017.1381940>.
- KHATUN, M.; SARKAR, S.; ERA, F.M.; ISLAM, A.K.M.M.; ANWAR, M.P.; FAHAD, S.; DATTA, R.; ISLAM, A.K.M.A. (2021). **Drought Stress in Grain Legumes: Effects, Tolerance Mechanisms and Management.** *Agronomy*, 11, 2374. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122374>.
- KIM, K.H.; KABIR, E.; JAHAN, S.A. (2017). **Exposure to Pesticides and the Associated Human Health Effects.** *Sci. Total Environ.*, 575, 525–535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.009>.
- KORCELSKI C (2016). **Cultivo do trigo duplo propósito em sistemas silvipastoris.** Dissertação (Mestrado em Agronomia: Agricultura e Ambiente) Universidade Federal de Santa Maria - Frederico Westphalen, 98p.

- KUMAR R, SINGH V, PAWAR SK, SINGH PK, KAUR A AND SHARMA D, (2019). **Abiotic stress and wheat grain quality: a comprehensive review, in Wheat Production in Changing Environments.** Springer Singapore pp. 63–87. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6883-7_3.
- KUMAR, S.; ISLAM, A.R.M.T.; ISLAM, H.M.T.; HASANUZZAMAN, M.; ONGOMA, V.; KHAN, R.; MALLICK, J. (2021). **Water Resources Pollution Associated with Risks of Heavy Metals from Vatukoula Goldmine Region.** Fiji. J. Environ. Manag., 293, 112868. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112868>.
- KVGK, V. P., & RAO, R. (2019). **Various plant's responses and strategies to cope with the water deficit: A review.** ~ 159 ~ Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 8(1), 159–168.
- KWAK, S.S. (2019). **Biotechnology of the sweetpotato: Ensuring global food and nutrition security in the face of climate change.** Plant Cell Rep., 38, 1361–1363. <https://doi.org/10.1007/s00299-019-02468-0>.
- LAFITTE, H.R.; YONGSHENG, G.; YAN, S.; LI, Z.-K. (2006). **Whole plant responses, key processes, and adaptation to drought stress: The case of rice.** J. Exp. Bot., 58, 169–175. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl101>.
- LAMBIN, E. F., TURNER, B. L., GEIST, H. J., AGBOLA, S. B., ANGELSEN, A., BRUCE, J. W., COOMES, O. T., DIRZO, R., FISCHER, G., FOLKE, C., GEORGE, P. S., HOMEWOOD, K., IMBERNON, J., LEEMANS, R., LI, X., MORAN, E. F., MORTIMORE, M., RAMAKRISHNAN, P. S., RICHARDS, J. F., ... XU, J. (2001). **The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths.** Global Environmental Change, 11(4), 261–269. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3).
- LAURIE, S.M.; BAIRU, M.W.; LAURIE, R.N. (2022). **Analysis of the nutritional composition and drought tolerance traits of sweet potato: Selection criteria for breeding lines.** Plants, 11, 1804. <https://doi.org/10.3390/plants11141804>.
- LEI, C.; BAGAVATHIANNAN, M.; WANG, H.; SHARPE, S.M.; MENG, W.; YU, J. (2021). **Osmopriming with Polyethylene Glycol (Peg) for Abiotic Stress Tolerance in Germinating Crop Seeds: A Review.** Agronomy, 11, 2194. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112194>.
- LENG, G.; HALL, J. (2019). **Crop yield sensitivity of global major agricultural countries to droughts and the projected changes in the future.** Sci. Total Environ., 654, 811–821. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.434>.
- LITORIYA NS, MODI AR, TALATI JG (2018). **Nutritional evaluation of durum wheat with respect to organic and chemical fertilizers.** Agricultural Research, v. 7, n. 2, p. 152-157. <https://doi.org/10.1007/s40003-018-0301-2>.
- LIU, M.; ZHANG, Q.; JIN, R.; ZHAO, P.; ZHU, X.; WANG, J.; YU, Y.; TANG, Z. (2023). **The Role of IAA in regulating root architecture of sweetpotato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam) in response to potassium deficiency Stress.** Plants, 12, 1779. <https://doi.org/10.3390/plants12091779>.

LIU, Y.; et al. (2016). **Effect of polyamines on the grain filling of wheat under drought stress.** *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 100, p. 113–129.

<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.01.003>.

LOTFI, R.; ABBASI, A.; KALAJI, H.M.; IESKANDARI, I.; SEDGHIEH, V.; KHORSANDI, H.; SADEGHIAN, N.; YADAV, S.; RASTOGI, A. (2022). **The role of potassium on drought resistance of winter wheat cultivars under cold dryland conditions: Probed by chlorophyll a fluorescence.** *Plant Physiol. Biochem.*, 182, 45–54.

<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.04.010>.

MALINOWSKA, M.; DONNISON, I.; ROBSON, P. (2020). **Morphological and Physiological Traits That Explain Yield Response to Drought Stress in Miscanthus.**

Agronomy, 10, 1194. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081194>.

MANAVALAN, LP; GUTTKONDA, SK; NGUYEN, HT (2009). **Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean.** *Plant Cell Physiology*, v. 50, n. 7, p. 1260-1276. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcp082>.

MGCIBELO, M.N. (2014). **Agronomic and Physiological Approaches to Improving Productivity of Selected Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) Cultivars in Kwazulu-Natal: A Focus on Drought Tolerance.** Ph.D. Thesis, University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg, South Africa, p. 142.

MICHEL D, ERIKSSON M, KLIMES M (2021) **Climate change and (in) security in transboundary river basins.** *Handbook of Security and the Environment*: Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781789900668.00012>.

MOHAMMADKHANI, N.; HEIDARI, R. (2008) **Drought-induced accumulation of sugars and proline in two maize varieties.** *World Applied Sciences Journal*, Babol, v.3, p.449-453.

MONTI, A.; AMADUCCI, M.T.; PRITONI, G.; VENTURI, G. (2006). **Variation in carbon isotope discrimination during growth and at different organs in sugar beet (*Beta vulgaris* L.).** *Field Crops Res.*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.01.002>.

MOTSA, N.M.; MODI, A.T.; MABHAUDHI, T. (2015). **Sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) as a drought tolerant and food security crop.** *S. Afr. J. Sci.*, 111, 8.

<http://dx.doi.org/10.17159/sajs.2015/20140252>.

MURSHED M, DAO NTT (2020). **Revisiting the CO2 emission-induced EKC hypothesis in South Asia: the role of Export Quality Improvement.** *GeoJournal*.

<https://doi.org/10.1007/s10708-020-10270-9>.

MURSHED M, NURMAKHANOVA M, AL-TAL R, MAHMOOD H, ELHEDDAD M, AHMED R (2022) **Can intra-regional trade, renewable energy use, foreign direct investments, and economic growth reduce ecological footprints in South Asia? Energy Sources. Part B: Economics, Planning, and Policy.**

<https://doi.org/10.1080/15567249.2022.2038730>

NASIM, W.; AMIN, A.; FAHAD, S.; AWAIS, M.; KHAN, N.; MUBEEN, M.; WAHID, A.; REHMAN, M.H.; IHSAN, M.Z.; AHMAD, S.; et al. (2018). **Future risk assessment by estimating historical heat wave trends with projected heat accumulation using SimCLIM climate model in Pakistan.** *Atmos. Res.*, 205, 118–133.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.01.009>.

- NAZ, S.; PERVEEN, S. (2021). **Response of Wheat (*Triticum aestivum* L. Var. Galaxy-2013) to Pre-Sowing Seed Treatment with Thiourea under Drought Stress.** *Pakistan J. Bot.*, 53, 1209–1217. [http://dx.doi.org/10.30848/PJB2021-4\(20\)](http://dx.doi.org/10.30848/PJB2021-4(20)).
- PORTER JR, CHALLINOR AJ, HENRIKSEN CB, HOWDEN SM, MARTRE P AND SMITH P. (2019). **Invited review: intergovernmental panel on climate change, agriculture, and food—a case of shifting cultivation and history.** *Glob Chang Biol* 25: 2518–2529. <https://doi.org/10.1111/gcb.14700>.
- RAHMAWATI, N.; LAHAY, R.R.; IRMANSYAH, T.; MAWARNI, L. (2020). **Yield and tuber quality of orange-fleshed sweet potato cultivars under drought stress in greenhouse.** *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 454, 012159. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/454/1/012159>.
- RAMPINO, P.; PATALEO, S.; GERARDI, C.; MITA, G.; PERROTTA, C. (2006). **Drought stress response in wheat: Physiological and molecular analysis of resistant and sensitive genotypes.** *Plant Cell Environ.* 29, 2143–2152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01588.x>.
- REDDY, R.; SOIBAM, H.; AYAM, V.; PANJA, P.; MITRA, S. (2017). **Morphological characterization of sweet potato cultivars during growth, development and harvesting.** *Indian J. Agric. Res.*, 52, 46–50. <https://doi.org/10.18805/IJARE.A-4798>.
- RICHARDS, R. A. (1983). **Manipulation of leaf area and its effect on grain yield in droughted wheat.** *Australian Journal of Agricultural Research*, v. 34, n. 1, p. 23–31. <https://doi.org/10.1071/ar9830023>.
- RODRIGUES AC., AMANO É, DE ALMEIDA SL (2015). **Anatomia vegetal.** CED/LANTEC/UFSC. Florianópolis, 152p.
- ROLLINS, J.A.; HABTE, E.; TEMPLER, S.E.; COLBY, T.; SCHMIDT, J.; VON KORFF, M. (2013). **Leaf proteome alterations in the context of physiological and morphological responses to drought and heat stress in barley (*Hordeum vulgare* L.).** *J. Exp. Bot.*, 64, 3201–3212. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert158>.
- RÜDELL EC, et al. (2021). **Adaptability and stability of wheat cultivars in the Northern region of Rio Grande do Sul. Brazilian Journal of Development.** Curitiba, v.7, n.5, p.47625-47641. <https://doi.org/10.34117/bjdv.v7i5.29672>.
- RUIZ GC, CANARTE E, MENDOZA A, GUILLEN FMC (2017). **Manual técnico del cultivo de camote.** Portoviejo, EC: INIAP, Estación Experimental Portoviejo/ESPAM 85p.
- SAPAKHOVA Z, RAISSOVA N, DAUROV D, ZHAPAR K, DAUROVA A, ZHIGAILOV A, ZHAMBAKIN K, SHAMEKOVA M. (2023). **Sweet Potato as a Key Crop for Food Security under the Conditions of Global Climate Change: A Review.** *Plants* 2023, 12(13), 2516. <https://doi.org/10.3390/plants12132516>.
- SAVYATA KANDEL. (2021). **Wheat Responses, Defence Mechanisms and Tolerance to Drought Stress: A Review Article.** *International Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology*, 8(5), 99–109. <https://doi.org/10.31033/ijrasb.8.5.14>
- SCHUURMANS C (2021) *The world heat budget: expected changes* *Climate Change* (pp. 1–15): CRC Press

- SHAO, H.; CHU, L.; JALEEL, C. A.; ZHAO, C. (2008). **Water-deficit stress induced anatomical changes in higher plants.** *Comptes Rendus Biologies, Paris*, v. 331, p. 215-225. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2008.01.002>.
- SHAO, H.H.; CHEN, S.D.; ZHANG, K.; CAO, Q.H.; ZHOU, H.; MA, Q.Q.; HE, B.; YUAN, X.H.; WANG, Y.; CHEN, Y.H.; et al. (2014). **Isolation and expression studies of the ERD15 gene involved in drought-stressed responses.** *Genet. Mol. Res.*, 13, 10852–10862. <https://doi.org/10.4238/2014.December.19.6>.
- SHARMA, M.; DELTA, A.K.; KAUSHIK, P. (2021). **Glomus Mosseae and Pseudomonas Fluorescens Application Sustains Yield and Promote Tolerance to Water Stress in Helianthus annuus L.** *Stresses*, 1, 305–316. <https://doi.org/10.3390/stresses1040022>.
- SILVA, A. J.; MAGALHÃES FILHO, J. R.; SALES, C. R. G.; PORES, R. C. M.; MACHADO, E, C. (2018). **Source-sink relationships in two soybean cultivars with indeterminate growth under water deficit.** *Bragantia*, v. 77, n. 1, p. 23-35. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2017010>.
- SILVA, E. A. (2017). **A cultura do trigo em Minas Gerais.** In: OLIVEIRA NETO, A. A.; SANTOS, C.M. R. (Orgs.). *A cultura do trigo*. Brasília: Conab, p. 57-62.
- SILVA, F. G.; DUTRA, W. F.; DUTRA, A. F.; OLIVEIRA, I. M.; FILGUEIRAS, L. M.; MELO, A. S. (2015). **Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em plantas de berinjela sob lâminas de irrigação.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 10, p. 946-952. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n10p946-952>.
- SILVA, J.B.C; LOPES, C.A; MAGALHÃES, J.S. (2008). **Cultivo da batata-doce.** Brasília: EMBRAPA-CNPq, *Sistemas de Produção*. v. 6.
- SILVEIRA, M. (2007). *A cultura da batata-doce como fonte de matéria-prima para produção de etanol.* Boletim Técnico – UFT. Tocantins: Ed. Maio. PILON, L. et al. (2021). **Quality characterization, phenolic and carotenoid content of new orange, cream and yellow-fleshed sweetpotato genotypes.** *Horticultura Brasileira*, v. 39, n. 3, p. 299–304. <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-20210309>.
- SILVEIRA, M. A (2008). **Batata-Doce: uma Nova Alternativa para a Produção de Etanol.** Instituto Euvaldo Lodi. Núcleo Central – Brasília. *Álcool combustível, (Série Indústria em Perspectiva)*, 163 p.
- TIAN, H.; et al. (2020). **An IPSO-BP neural network for estimating wheat yield using two remotely sensed variables in the Guanzhong Plain, PR China.** *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 169, p. 105180. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105180>.
- TUMOVÁ, L.; TARKOWSKÁ, D.; ŘEHOVÁ, K.; MARKOVÁ, H.; KOČOVÁ, M.; ROTHOVÁ, O.; ČEČETKA, P.; HOLÁ, D. (2018). **Drought-Tolerant and Drought-Sensitive Genotypes of Maize (Zea mays L.) Differ in Contents of Endogenous Brassinosteroids and Their Drought-Induced Changes.** *PLoS ONE*, 13, e0197870. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197870>.
- VALLIERE, J.M.; ZHANG, J.; SHARIFI, M.R.; RUNDEL, P.W. (2019). **Can We Condition Native Plants to Increase Drought Tolerance and Improve Restoration Success?** *Ecol. Appl.*, 29, e01863. <https://doi.org/10.1002/eap.1863>.

- VILLORDON, A.; CLARK, C.; FERRIN, D.; LABONTE, D (2009). **Using growing degree days, climatic variables, linear regression, and data mining methods to help improve prediction of sweetpotato harvest date and yield in Louisiana.** HortTechnology, v. 19, p. 133-144. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.19.1.133>.
- WAHAB A, ABDI G, SALEEM MH, ALI B, ULLAH S, SHAH W, MUMTAZ S, YASIN G, MURESAN CC, MARC RA. (2022). **Plants' Physio-Biochemical and Phyto-Hormonal Responses to Alleviate the Adverse Effects of Drought Stress: A Comprehensive Review.** Plants, 11, 1620. <https://doi.org/10.3390/plants11131620>.
- WIDURI, L.I.; LAKITAN, B.; SODIKIN, E.; HASMEDA, M.; MEIHANA, M.; KARTIKA, K.; SIAGA, E. (2018). **Shoot and Root Growth in Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Exposed to Gradual Drought Stress.** Agrivita, 40, 442–452.
- WU, J.; WANG, J.; HUI, W.; ZHAO, F.; WANG, P.; SU, C.; GONG, W. (2022). **Physiology of Plant Responses to Water Stress and Related Genes: A Review.** Forests, 13, 324. <https://doi.org/10.3390/f13020324>.
- YADAV, B.; JOGAWAT, A.; RAHMAN, M.S.; NARAYAN, O.P. (2021). **Secondary metabolites in the drought stress tolerance of crop plants: A review.** Gene Rep., 23, 101040. <https://doi.org/10.1016/j.genrep.2021.101040>.
- ZAHRA, N, HAFEEZ MB, WAHID A, AL MASRURI MH, ULLAH A, SIDDIQUE, KHM, FAROOQ M. (2022). **Impact of climate change on wheat grain composition and quality.** Journal of the Science of Food and Agriculture, 103, Issue 6 p. 2745-2751. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12289>.
- ZHAO, J.; REN, W.; ZHI, D.; WANG, L.; XIA, G. (2007). **Arabidopsis DREB1A/CBF3 bestowed transgenic tall fescue increased tolerance to drought stress.** Plant Cell Rep., 26, 1521–1528. <https://doi.org/10.1007/s00299-007-0362-3>.
- ZHOU, X.; et al. (2020). **Reconstruction of time series leaf area index for improving wheat yield estimates at field scales by fusion of Sentinel-2, -3 and MODIS imagery.** Computers and Electronics in Agriculture, v. 177, p. 105692. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105692>.

SEGUNDA PARTE: ARTIGOS

Artigos redigidos conforme a NBR 6022 (ABNT 2018) e formatado de acordo com o manual da UFLA.

ARTIGO 1: CARACTERÍSTICAS FENOTÍPICAS RELACIONADAS À PRODUTIVIDADE DE GENÓTIPOS DE BATATA-DOCE SOB DIFERENTES ÉPOCAS DE PLANTIO

RESUMO

O objetivo do trabalho foi avaliar as características fenotípicas anatômicas e morfofisiológicas de quatro genótipos de batata-doce como ferramentas para o entendimento da plasticidade fenotípica e aumento do potencial produtivo desses genótipos em diferentes épocas de plantio. Foram utilizados na primeira e segunda época de plantio quatro genótipos de batata-doce oriundos da seleção 2018 do banco de Germoplasma da Universidade Federal de Lavras: I) UFLA-464; (II) UFLA- 1432; (III) UFLA-268 e (IV) UFLA-713. Os períodos mais críticos do ciclo fenológico (período vegetativo e floração/formação de raízes tuberosas) ocorreram na primeira etapa do experimento (1º plantio), quando houve menores precipitações e umidade relativa do ar, pois na região nesta época de outono/inverno o clima é mais seco. Na segunda etapa do experimento (2º plantio), houve maiores precipitações, uma vez que o clima na região na época de primavera/verão é mais chuvoso. A estação chuvosa apresentou diferenças significativas em todas as características de crescimento das plantas analisadas, porém os genótipos não são afetados da mesma forma pela estação seca. Os genótipos de batata-doce 464 e 1432 apresentam características fenotípicas anatômicas e morfofisiológicas que os agrupam como genótipos de resistência a baixas precipitações. Esses genótipos destacam-se por ter características de resistência a baixa disponibilidade hídrica e capacidade de redução da perda de água, como de alta eficiência de trocas gasosas, bem como características anatômicas do mesófilo favoráveis a seca ao controle da transpiração e para fotossíntese, alta produtividade, maior biomassa, capacidade de redução da perda de água. E os genótipos 268 e 713 como opostos a estas características e necessitando de maior disponibilidade de água. As características fenotípicas dos genótipos 464 e 713 são consideráveis para culturas destinadas a áreas propensas a baixa disponibilidade hídrica, mas inconveniente para regiões onde é provável que ocorra apenas estresse moderado, podendo reduzir a quantidade de irrigação.

Palavras chave: Índice de plasticidade de distância relativa (RDPI), Anatomia da folha, produtividade, *Ipomoea batatas* [L.] Lam.

PHENOTYPIC CHARACTERISTICS RELATED TO THE PRODUCTIVITY OF SWEET POTATO GENOTYPES UNDER DIFFERENT PLANTING TIMES

ABSTRACT

The aim of the study was to assess the phenotypic anatomical and morphophysiological characteristics of four sweet potato genotypes as tools for understanding phenotypic plasticity and enhancing the productive potential of these genotypes at different planting times. In the first and second planting periods, four sweet potato genotypes from the 2018 selection of the Germplasm Bank of the Federal University of Lavras were used: I) UFLA-464; (II) UFLA-1432; (III) UFLA-268; and (IV) UFLA-713. The most critical periods of the phenological cycle (vegetative period and flowering/tuber root formation) occurred in the first phase of the experiment (first planting), when there was less precipitation and relative humidity, as the climate in the region is drier during autumn/winter. In the second phase of the experiment (second planting), there was more precipitation, as the climate in the region during spring/summer is wetter. The rainy season showed significant differences in all plant growth characteristics analyzed, but the genotypes were not affected in the same way by the dry season. Sweet potato genotypes 464 and 1432 have anatomical and morphophysiological phenotypic characteristics that group them as resistant to low precipitation. These genotypes stand out for their traits of resistance to low water availability and ability to reduce water loss, such as high gas exchange efficiency, as well as anatomical characteristics of the mesophyll favorable to drought, controlling transpiration, and for photosynthesis, high productivity, greater biomass, and the ability to reduce water loss. Genotypes 268 and 713, on the other hand, have opposite characteristics and require higher water availability. The phenotypic characteristics of genotypes 464 and 713 are notable for crops intended for areas prone to low water availability but are less suitable for regions where only moderate stress is likely, potentially reducing the need for irrigation.

Keywords: Relative distance plasticity index (IPDR), Leaf anatomy, productivity, *Ipomoea batatas* [L.] Lam.

1 INTRODUÇÃO

A batata-doce (*Ipomoea batatas* [L.] Lam) é uma hortaliça tuberosa da família botânica Convolvulaceae. É amplamente cultivada em todo o mundo, por ser uma cultura resiliente, devido a sua produção viável, seu notável rendimento e adaptabilidade a uma variedade de condições climáticas e sistemas agrícolas (Chandrasekara; Josheph Kumar, 2016). Além de suas características agronômicas favoráveis, a batata-doce é uma fonte abundante de nutrientes essenciais, como proteínas, carboidratos, minerais, vitaminas, carotenoides, fibras alimentares e polifenóis. Estudos destacaram os diversos benefícios para a saúde associados ao consumo de batata-doce, incluindo suas propriedades antioxidantes (Lee et al., 2019) anticancerígenas (kato et al., 2021), anti-inflamatórias (Majid et al., 2018), protetoras do fígado (Chandrasekara; Josheph Kumar, 2016) e preventivas de doenças cardiovasculares (Amante et al., 2022). Esses efeitos positivos tornam a batata-doce um alimento valioso na prevenção e redução da desnutrição e da má alimentação, tanto em países em desenvolvimento quanto desenvolvidos.

Em um contexto de mudanças climáticas, onde padrões de precipitação são imprevisíveis, existem desafios na produção de batata-doce por condições como o déficit hídrico, surgindo como um fator preponderante que reduzem a produtividade da batata-doce em todo o mundo (Shao et al., 2014). A produção de raízes de batata-doce também é influenciada pela quantidade e época da precipitação, quando os plantios forem feitos em época seca é recomendável a irrigação ou quando ocorrerem longos períodos sem chuvas, com a necessidade de água durante seu crescimento, o que aumenta os custos indiretos de produção (Gajanayake et al., 2013). Ao mesmo tempo, uma certa vantagem da batata-doce é que ela tem uma resistência moderada à seca, mas se as condições de seca prevalecem é especialmente suscetível durante o período de estabelecimento, inclusive nas fases iniciais do desenvolvimento vegetativo e na formação das raízes tuberosas (Sapakhova et al., 2023).

A seca desencadeia uma variedade de modificações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas na batata-doce, as quais podem exercer um impacto sobre sua produção agrônômica e econômica. Por exemplo, a escassez de água em plantas de batata-doce reduz a fotossíntese, oriundo do fechamento estomático e redução da área foliar. Com isso, diminuindo a produção de raízes, ramificação, área foliar, altura e comprimento de caule (Naawe et al., 2021). Quando a batata-doce é exposta às condições de déficit hídrico, observa-se uma redução na taxa fotossintética devido à diminuição da fluorescência da clorofila 'a', à condutância estomática, à concentração de dióxido de carbono (CO₂) dentro da célula, assim como à taxa de assimilação de CO₂, principalmente através do fechamento estomático (Van Heerden;

Laurie, 2008). Investigar essas características fenotípicas na eficiência fotossintética podem modular a resposta da planta aos desafios ambientais é essencial para otimizar a produção.

As características fenotípicas anatômicas e morfofisiológicas são fundamentais para resistência o déficit hídrico e melhorar a produtividade. Durante a resistência à seca na batata-doce, ocorrem adaptações anatômicas, como o desenvolvimento de tecidos esponjosos que funcionam como reservatórios de água (Bahadur et al., 2021.). Isso leva a redução do crescimento e da área foliar, o que limita a perda de água e diminui a taxa de transpiração (Xoconostle et al., 2010). Como os estômatos desempenham um papel fundamental na regulação do uso de água pelas plantas e no ganho de carbono, eles representam um alvo fundamental para melhorar a eficiência do uso da água (Bertolino; Caine; Gray, 2019). Características como a estrutura dos estômatos e a alocação eficiente de recursos são elementos-chave para entender as estratégias adaptativas da planta. Características como densidade e tamanho dos estômatos têm impacto significativo no rendimento e na sobrevivência das plantas (Driesen et al., 2020). Estudos focados nas características foliares anatômicas são escassos para a cultura da batata-doce, para as características fisiológicas, como as trocas gasosas há estudos recentes que relacionam estas características com o rendimento de biomassa em condições de déficit hídrico (Delazari et al., 2018; Huan et al., 2020; Huang et al., 2020; Bahadur et al., 2021; Naawe et al., 2021; Zhou et al., 2023).

Apesar dos avanços na pesquisa, existe uma lacuna substancial de conhecimento na inter-relação entre as características fenotípicas anatômicas e morfofisiológicas da batata-doce e sua resposta à produtividade em diferentes condições hídricas. Esta lacuna destaca a necessidade premente de investigações que aprofundem nossa compreensão dessas complexas relações, fornecendo informações valiosas para orientar estratégias de cultivo e a utilização de genótipos com potencial genético em condições de crescimento muitas vezes desfavoráveis. Preencher esta lacuna é essencial para avançar no conhecimento e aplicação prática, promovendo uma produção mais eficiente e sustentável da batata-doce. A hipótese deste estudo é que existem variações significativas nas características fenotípicas anatômicas, morfofisiológicas e produtividade presente em genótipos de batata-doce e que estas características podem relacionar com resistência a baixas precipitações. Portanto, o objetivo do trabalho foi avaliar as características fenotípicas anatômicas e morfofisiológicas de quatro genótipos de batata-doce como ferramentas para o entendimento da plasticidade fenotípica de resistência a baixas precipitações e no aumento do potencial produtivo desses genótipos em diferentes condições climáticas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Delineamento Experimental e Material Vegetal

Os experimentos foram conduzidos em campo, no Centro de Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia (CDTT) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), situado nas coordenadas geográficas, 21°14'16" S e 45°08'00" W, 918 m de altitude. Todas as análises subsequentes descritas foram realizadas ao final de cada um dos dois períodos de plantio. Esses períodos consistiram entre abril a outubro de 2019 e outubro de 2019 a abril de 2020, compreendendo as estações secas (inverno) e chuvosas (verão) do local de cultivo. O local de cultivo está localizado no sul de Minas Gerais e apresenta clima Cwb - subtropical, com verões chuvosos e invernos frios e secos segundo a classificação de Köppen e Geiger. A precipitação média anual da cidade de Ijaci-MG é de 1486 mm, com temperatura média anual de 19.9 °C. Os dados climatológicos foram obtidos por meio da Estação Climatológica da UFLA (Tabela 1).

Tabela 1. Médias dos dados climatológicos dos períodos de plantio da batata-doce. 1º plantio: Estação seca (abril a outubro de 2019) e 2º plantio: Estação chuvosa (outubro de 2019 a abril de 2020).

Estações	Precipitação (mm)	Insolação Total (h)	Temperatura média (°C)	Humidade Relativa (%)
Outono/ Inverno (Estação seca)	39.68	235.82	20.13	66.15
Primavera/ Verão (Estação Chuvosa)	161.11	174.11	21.91	72.33

O plantio se deu a partir de segmentos do caule de batata-doce coletados no banco de germoplasma da UFLA. Cada segmento do caule apresentou o tamanho aproximado de 30 cm, com seis a oito gemas, sendo que três destas gemas foram enterradas ao solo para enraizamento. Após 15 dias do plantio, foi realizada uma conferência e replantio das plantas nas parcelas, de forma a garantir a presença das doze plantas por parcela. A irrigação foi realizada por um sistema de gotejamento mantendo a umidade do solo próximo a capacidade de campo para os dois períodos de plantio. O preparo do solo foi realizado com aração e gradagem, sendo, posteriormente, confeccionados camalhões de 0,35 m de altura. Foram utilizados quatro genótipos de batata-doce provenientes do banco de germoplasma da Universidade federal de Lavras, contrastantes quanto à sua produtividade: UFLA-464; UFLA- 1432 com maior produtividade; e UFLA-268 e UFLA-713 com menor produtividade (Costa et al., 2022). Os

dois períodos de experimento na estação seca e chuvosa foram conduzidos em delineamento experimental de blocos casualizados, esquema fatorial 3×4 (Três parcelas e quatro genótipos). A adubação foi feita com base na recomendação para a cultura da batata-doce (Ribeiro; Guimarães; Alvarez, 1999).

2.2 Análises de Crescimento

As medidas de avaliação do crescimento das plantas nas duas etapas foram realizadas aos 180 dias (fase de maturação) após cada plantio, onde foram avaliadas as seguintes variáveis agrônômicas e de crescimento para os quatro genótipos: I- produtividade de raízes totais: obtida pela pesagem de todas as raízes, e os resultados convertidos para t/ha⁻¹; II- massa seca de raízes: foi coletada uma amostra de 200g das raízes e, posteriormente, trituradas e secas em estufa a 65 °C, até que atingisse massa constante, conforme Gonçalves Neto et al. (2011). Ao final, foi calculada a massa seca em porcentagem através da fórmula: massa seca de raízes (%) = [peso seco da amostra (g) / peso úmido da amostra (g)] x 100; III- produtividade de massa seca de raízes totais: obtido da multiplicação da produtividade de raízes totais pela porcentagem de massa seca de raízes, sendo os resultados convertidos para t/ha⁻¹; IV- massa seca de parte aérea: foi coletada uma amostra de 200 g da parte aérea e, posteriormente, trituradas e secas em estufa a 65 °C, até que atingisse massa constante, conforme (Gonçalves Neto et al., 2012). Ao final, foi calculada a massa seca em porcentagem através da fórmula: massa seca de parte aérea (%) = [peso seco da amostra (g) / peso úmido da amostra (g)] x 100. Para determinar a área foliar, as folhas foram coletadas, e em seguida determinou-se a área por meio de um Scanner A3 (1200S, Mustek, China) e quantificado com análise de imagem com o software ImageJ.

Após obtenção da matéria seca e área foliar, calculou-se a razão raiz/parte aérea (g.g⁻¹), a razão massa foliar (gg⁻¹) e a razão de área foliar (cm² g⁻¹) e área foliar específica (cm² g⁻¹).

2.3 Análises de Trocas Gasosas

As avaliações de trocas gasosas ocorreram aos 130 dias para cada uma das épocas de cultivo utilizando um analisador de gases por infravermelho (IRGA) modelo LI-6400XT (Li-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska, EUA), com uma câmera de 6 cm² e uma fonte de luz vermelha/azul LED (LI-6400-02B, Li-Cor, Lincoln, Nebraska, EUA). Estas avaliações foram realizadas na quinta folha completamente expandida e com boas condições fitossanitárias. As medidas foram realizadas entre 8 e 11 horas, e a densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD) foi padronizado em 1000 μmol m⁻² s⁻¹, o déficit de pressão de vapor foi de 1,63 kPa, o

fluxo da bomba foi ajustado para $500 \mu\text{mol s}^{-1}$ e a temperatura do bloco para $28 \text{ }^\circ\text{C}$. A concentração de CO_2 foi mantida a 380 ppm durante as análises de trocas gasosas.

Assim, foram avaliadas a taxa de assimilação líquida (A), condutância estomática (g_{sw}) e a transpiração (E). Calculado a eficiência do uso da água na assimilação fotossintética de CO_2 – WUE (A/E).

2.4 Análises Anatômicas

Para as análises anatômicas, as folhas (5ª folha a partir do ápice da planta) foram coletadas aos 130 dias para as duas épocas de cultivo e fixadas em formaldeído, ácido acético glacial e etanol 70% (F.A.A.70%) por 72 horas e, posteriormente, conservadas em etanol 70% até a data das avaliações.

Para a realização das secções transversais, as folhas coletadas foram submetidas à uma série etanólica crescente para a desidratação (70, 80, 90 e 100%) de acordo com Johansen (1940) com modificações. Em seguida, as amostras foram infiltradas e polimerizada em historesina de hidroxietilmetacrilato de acordo com as especificações do fabricante (Leica, Heidelberg, Alemanha). As secções foram obtidas em micrótomo rotativo semiautomático Yidi YD-335 (Jinhua Yidi Medical Appliance CO., LTD, Zhejiang, China), com espessura de $8 \mu\text{m}$, sendo, em seguida, corados com solução de Azul de Toluidina 1% pH 6,7 (Feder; O'Brien, 1968) e montadas as lâminas permanentes.

As secções paradérmicas das folhas foram feitas manualmente com auxílio de lâmina de aço, posteriormente foram submetidas ao processo de clarificação com hipoclorito de sódio a 50%, lavadas em água destilada. As secções foram coradas com Safranina (1% v.v⁻¹), e posteriormente montadas em lâminas com glicerina a 50% (Kraus; Arduin, 1997). As lâminas foram observadas em microscópio trinocular (CX31, Olympus Tokyo, Japan), com sistema de captura acoplado, sendo fotografadas para posterior análise utilizando o software de análise de imagem ImageJ.

As seguintes características anatômicas foram avaliadas na secção transversal da folha: Na nervura central, a área do feixe vascular e o diâmetro do metaxilema, e na região internerval, as espessuras de ambas as faces da epiderme, do mesofilo e dos parênquimas paliçádico e esponjoso. Para as seções paradérmicas foram avaliadas: densidade estomática e o índice estomático para ambas as faces da folha.

Foram avaliadas nove plantas por tratamento, com uma lâmina para cada planta, três secções transversais por lâmina e três amostras campos por secção paradérmica e transversal.

2.5 Índice de plasticidade de distância relativa

O índice de plasticidade de distância relativa (RDPI) foi calculado para todas as variáveis analisadas, conforme descrito por Valladares et al., (2006). Foram testadas três plantas de cada genótipo por bloco ($j = 1, 2, 3$) em cada etapa do experimento ($i = 1, 2$).

A plasticidade fenotípica para uma dada variável x pode estar relacionada à diferença de x entre dois indivíduos (j e j') do mesmo genótipo cultivados sob diferentes condições, por exemplo, estações seca e chuvosa (i e i') (Marchiori et al., 2017). O RDPI foi calculado como $\sum (d_{ij} \rightarrow i'j' / (x_{i'j'} + x_{ij})) / n$ onde n é o número de distâncias e foi descrito anteriormente (Valladares; Sanchez-Gomez; Zavala, 2006). O RDPI foi calculado com os dados para cada variável obtida de 180 dias do período experimental (desde a estaquia até a colheita das plantas).

2.6 Análise Estatística

As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o software SISVAR 5.0 (Ferreira, 2011). Os dados de trocas gasosas, anatômicos e RDPI foram submetidos ao teste de normalidade Shapiro–Wilk. Em seguida foi realizado à análise de variância (ANAVA) e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. Somente o RDPI, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

3 RESULTADOS

3.1 Crescimento da Planta

Na estação chuvosa houve diferenças significativas entre os genótipos. Durante a estação chuvosa, os genótipos menos produtivos (268 e 713) apresentaram as maiores médias de área foliar. Na estação seca, observou-se um incremento da área foliar apenas no genótipo 713 (Figura 1a). Comparando os genótipos em ambas as estações, todos tiveram o mesmo tipo de resposta a estação seca, resultando em redução da área foliar (Figura 1a).

Em relação à massa seca radicular durante a estação chuvosa, os genótipos mais produtivos apresentaram as maiores médias. A estação seca manteve o mesmo padrão observado na estação chuvosa para a massa seca radicular (Figura 1b). Comparando os genótipos em ambas as estações para a massa seca radicular, não foi verificado efeito do déficit hídrico na alteração desta medida (Figura 1b).

Quanto à massa seca da parte aérea, na estação chuvosa, não houve diferença entre os genótipos. Na estação seca, o efeito da seca promoveu redução em quase todos os genótipos, exceto o genótipo 713, que apresentou aumento da massa seca da parte aérea (Figura 1c).

Comparando os genótipos em ambas as estações para a massa seca da parte aérea, observou-se um comportamento semelhante ao efeito da seca, sendo que apenas o genótipo 713 manteve sua massa seca, enquanto todos os demais apresentaram redução (Figura 1c).

Na massa seca total durante a estação chuvosa, houve redução apenas no genótipo menos produtivo 268. Na estação seca, o efeito da seca promoveu redução em quase todos os genótipos, com exceção do genótipo mais produtivo 464 (Figura 1d). Comparando os genótipos em ambas as estações para a massa seca total, apenas o genótipo 1432 reduziu sua massa seca total em função do déficit hídrico (Figura 1d).

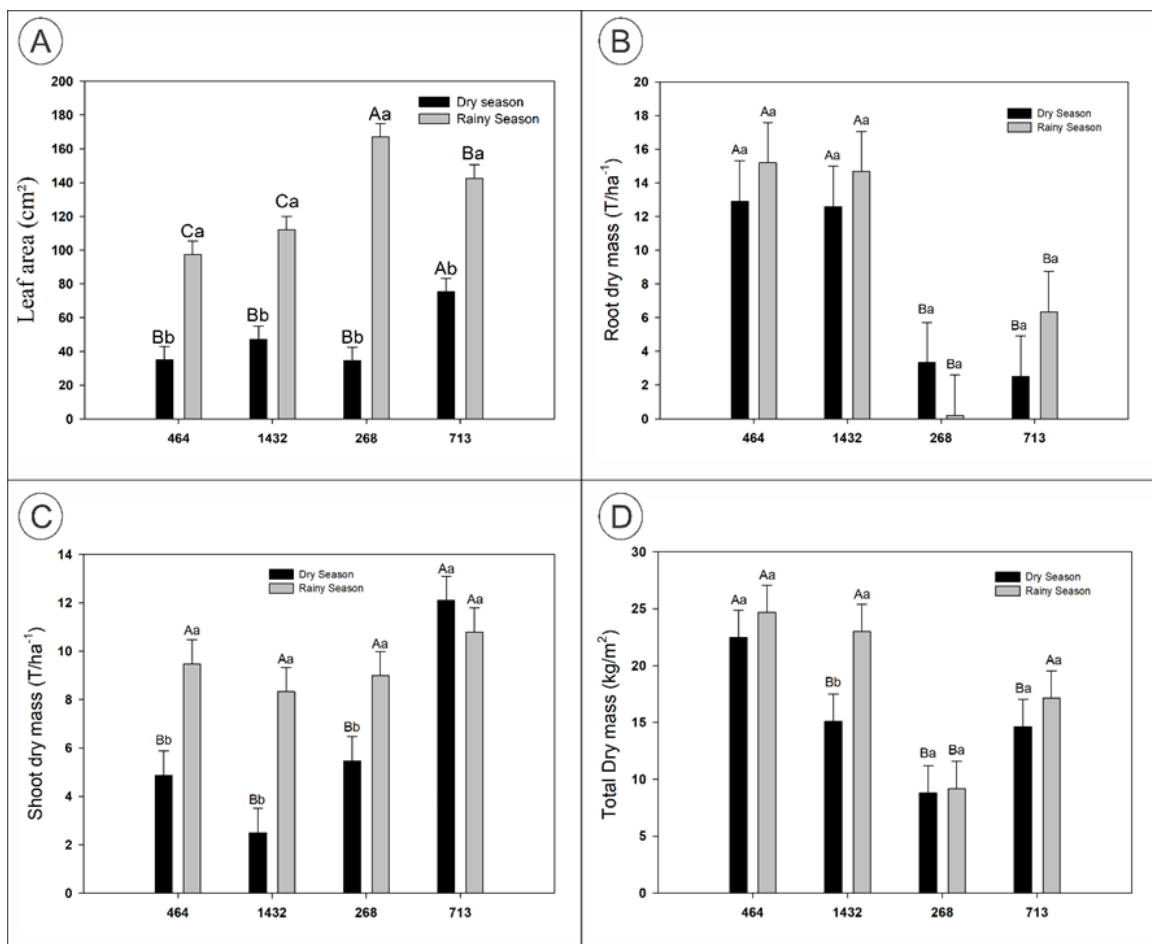


Figura 1. Características de crescimento das plantas dos genótipos de batata-doce (464/1432/268/713) sob duas estações: seca e chuvosa. As médias seguidas de letras iguais, maiúscula para a condição de estação e minúscula para o genótipo, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Barras = Erro padrão.

Durante a estação chuvosa, o genótipo menos produtivo 268 apresentou a maior área foliar específica, enquanto os demais genótipos mantiveram-se constantes. Na estação seca, o genótipo mais produtivo 1432 registrou a maior média de área foliar específica, e os demais genótipos permaneceram inalterados (Figura 2a). Comparando os genótipos em ambas as estações

para a área foliar específica, observou-se um aumento dessa medida nos genótipos menos produtivos em resposta ao aumento de água, enquanto o genótipo 1432 aumentou sua área foliar específica em condições de diminuição desse recurso, e o genótipo 464 não apresentou alterações (Figura 2a).

Em relação à proporção de área foliar durante a estação chuvosa, os genótipos menos produtivos apresentaram as maiores médias. Na estação seca, a proporção de área foliar não variou em função do déficit hídrico (Figura 2b). Comparando os genótipos em ambas as estações para a proporção de área foliar, apenas o genótipo mais produtivo (1432) foi capaz de manter essa proporção, enquanto os demais tiveram suas médias aumentadas em função do aumento de água (Figura 2b).

Para a razão raiz/parte aérea, durante ambas as estações, os genótipos mais produtivos apresentaram as maiores médias (Figura 2c). Comparando os genótipos em ambas estações, a maioria aumentou sua razão raiz/parte aérea em condições de menos disponibilidade hídrica, exceto o genótipo 713, que não teve alterações (Figura 2c).

Quanto à proporção de massa foliar, o efeito das estações chuvosa e seca apresentou tendências semelhantes: os genótipos menos produtivos tiveram as maiores médias nessa condição, ocorrendo o inverso da razão raiz/parte aérea (Figura 2c). Comparando os genótipos em ambas estações para a proporção de massa foliar, apenas o genótipo 713 foi capaz de aumentar sua proporção em condições de seca, enquanto os demais genótipos apresentaram comportamento oposto (Figura 2c).



Figura 2. Índices fisiológicos de crescimento dos genótipos de batata-doce (464/1432/268/713) sob duas estações: seca e chuvosa. As médias seguidas de letras iguais, maiúscula para a condição de estação e minúscula para o genótipo, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Barras = Erro padrão.

Tanto na estação chuvosa como na seca, os genótipos mais produtivos apresentaram maior média de produtividade total de raízes (t/ha^{-1}), enquanto os genótipos menos produtivos tiveram as menores médias (Figura 3). Comparando os genótipos em ambas as estações para a produtividade total de raízes tuberosas, observou-se que os genótipos mais produtivos mantiveram suas médias mais altas para esse parâmetro, enquanto os genótipos 268 e 713 apresentaram as médias mais baixas (Figura 3).

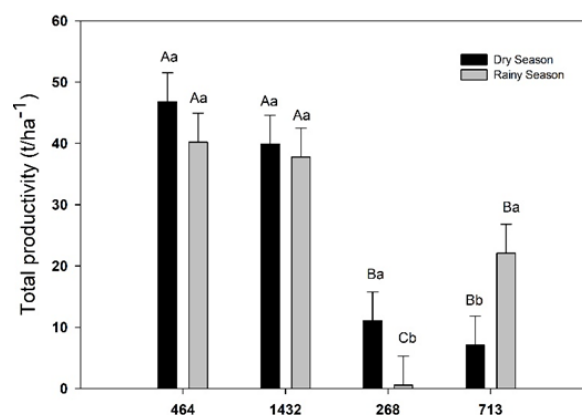


Figura 3. Produtividade total de raízes tuberosas (t/ha^{-1}) dos genótipos (464/1432/268/713) sob duas estações: seca e chuvosa. As Médias seguidas de letras iguais, maiúscula para a

condição de estação e minúscula para o genótipo, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Barras = Erro padrão.

3.2 Trocas Gasosas

Na estação chuvosa, não houve influência na taxa de assimilação líquida. Na estação seca, os genótipos mais produtivos apresentaram as maiores médias para as trocas gasosas das plantas (Figura 4a). Comparando os genótipos em ambas estações para a taxa de assimilação líquida, observou-se que os genótipos mais produtivos foram capazes de manter sua taxa, enquanto o genótipo 268 aumentou sua taxa em condições hídricas favoráveis, e o genótipo 713 apresentou comportamento contrário (Figura 4a).

Para a variável E, não alterou entre as estações e genótipos analisados (Figura 4b). Para as variáveis g_{sw} e WUE, durante ambas as estações, os genótipos mais produtivos e menos produtivos apresentaram as mesmas médias (Figura 4c, d). Comparando os genótipos em ambas estações, os genótipos menos produtivos diminuíram sua g_{sw} e WUE em condições de menos disponibilidade hídrica, exceto os mais produtivos, que não teve alterações (Figura 4c, d).

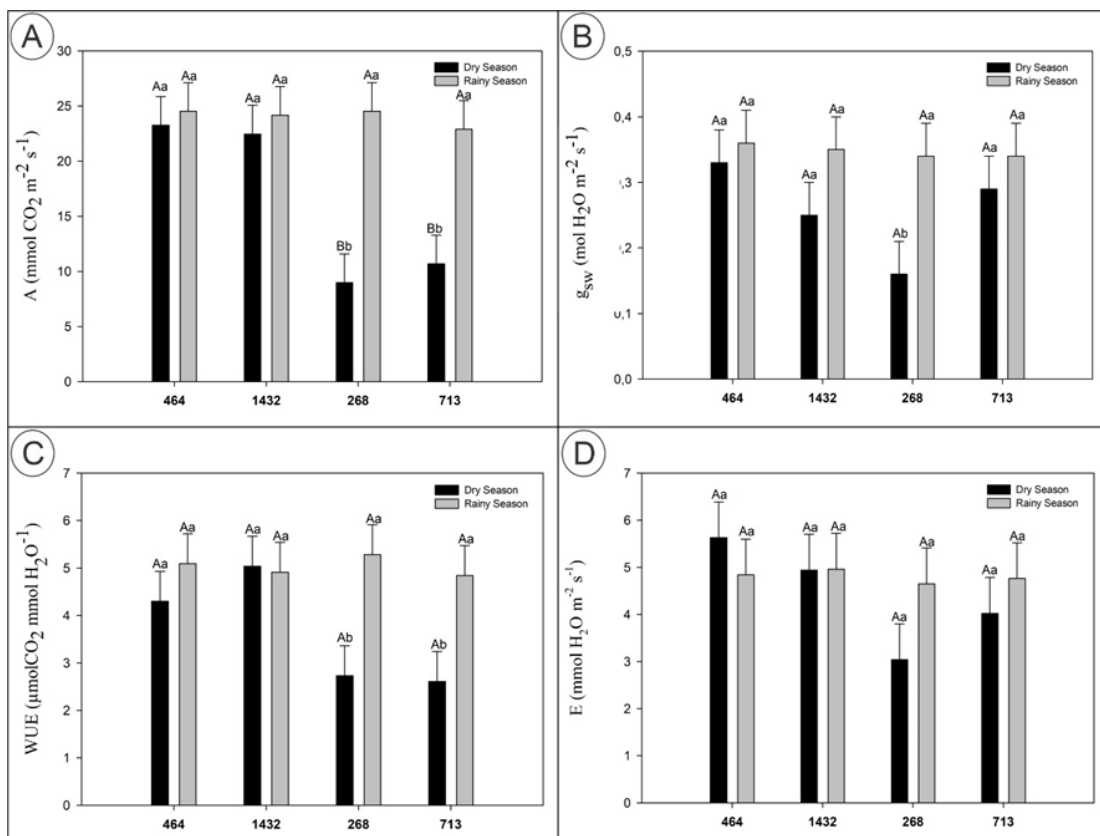


Figura 4. Trocas gasosas dos genótipos de batata-doce (464/ 1432/268/713) sob duas estações: seca e chuvosa. As Médias seguidas de letras iguais, maiúscula para a condição de estação e minúscula para o genótipo, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Barras =

Erro padrão. (A) taxa de assimilação líquida; (g_{sw}) condutância estomática; (E) transpiração e (WUE) eficiência do uso da água.

3.3 Anatomia Foliar

Analisando o índice estomático da face abaxial durante a estação chuvosa, não se observou alteração significativa para os genótipos (Figura 5a). No entanto, na estação seca, ocorreu uma diminuição desse parâmetro nos genótipos 1432 e 713 (Figura 5a). Ao analisar os genótipos especificamente, verificou-se que apenas os menos produtivos (268 e 713) apresentaram um aumento nas médias do índice estomático da face abaxial em condições de seca (Figura 5a).

Quanto ao índice estomático da face adaxial, os genótipos manifestaram o mesmo comportamento observado para ambas as estações (Figura 5b). Ao analisar os resultados entre os genótipos, é possível perceber que as condições hídricas não alteraram o índice estomático da face adaxial (Figura 5b).

Durante a estação chuvosa, apenas o genótipo 713, classificado como menos produtivo, apresentou aumento na espessura da epiderme abaxial. Contrariamente, na estação seca, os genótipos mais produtivos (434 e 1432) experimentaram uma diminuição nesse parâmetro (Figura 5b). Comparando os genótipos em ambas estações para a espessura da epiderme abaxial, somente o genótipo menos produtivo (268) apresentou aumento em resposta ao déficit hídrico (Figura 5c).

No que diz respeito à espessura da epiderme adaxial durante a estação chuvosa, apenas o genótipo 1432 demonstrou redução. Na estação seca, os genótipos produtivos apresentaram uma redução intermediária na espessura da epiderme adaxial, enquanto os genótipos menos produtivos, 713 e 268, registraram a maior e a menor redução, respectivamente (Figura 5d). Comparando os genótipos em ambas estações para a espessura da epiderme adaxial, observou-se que os genótipos mais produtivos experimentaram alterações nesse parâmetro em resposta ao déficit hídrico, enquanto os genótipos menos resistentes não apresentaram variações (Figura 5d).

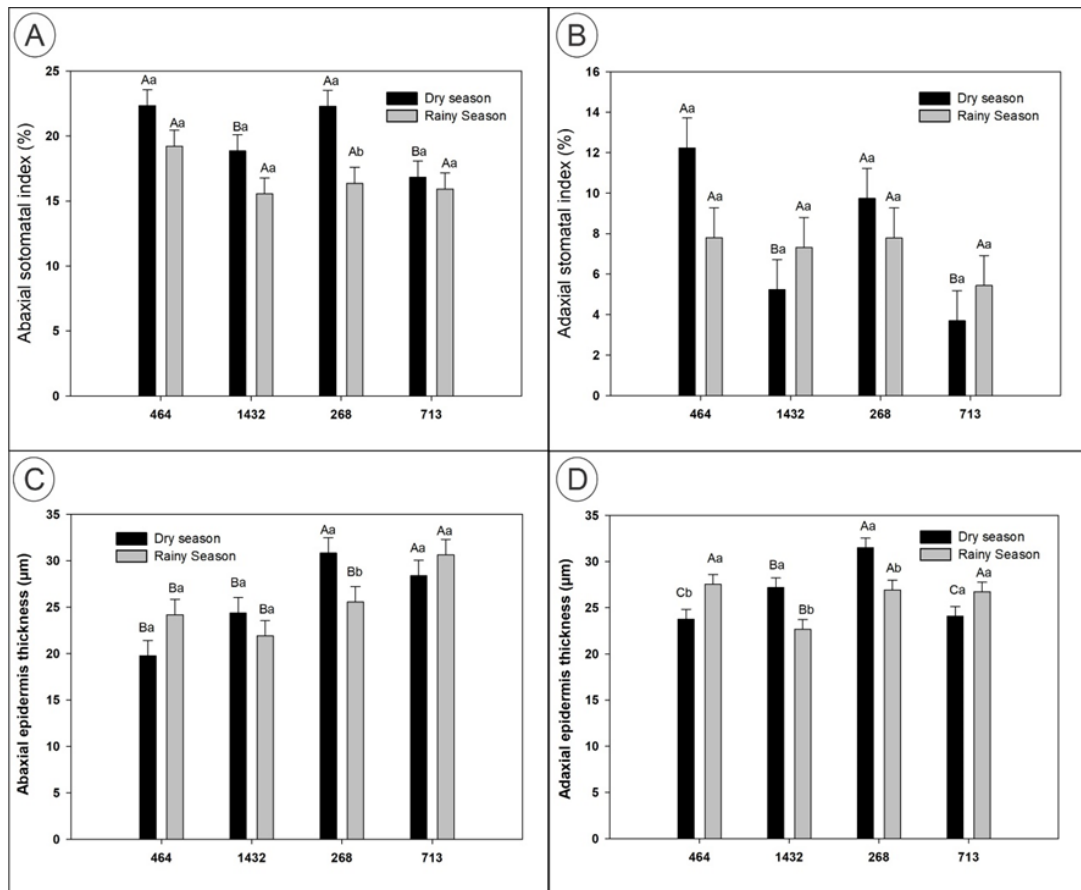


Figura 5. Índice estomático (a e b) e espessura da epiderme (c e d) de folhas de batata-doce dos genótipos 464, 1432, 268 e 713 sob as estações seca e chuvosa. As médias seguidas de letras iguais, maiúscula para a condição de estação e minúscula para o genótipo, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Barras = Erro padrão.

A estação seca influenciou substancialmente na espessura do parênquima paliçádico, onde se notou uma redução no genótipo 464 em comparação aos genótipos analisados (Fig. 6a, 7d, h). No entanto, o genótipo 464 em sua espessura do parênquima paliçádico não mostrou mudança significativa durante as estações (Fig. 7d, h). A maior espessura do parênquima paliçádico em relação a estação seca foi para o genótipo 1432 (Fig. 7e), sendo que na estação chuvosa os genótipos 464 e 713 foram maiores em sua espessura em relação aos outros genótipos (Fig. 6a e 7c, d).

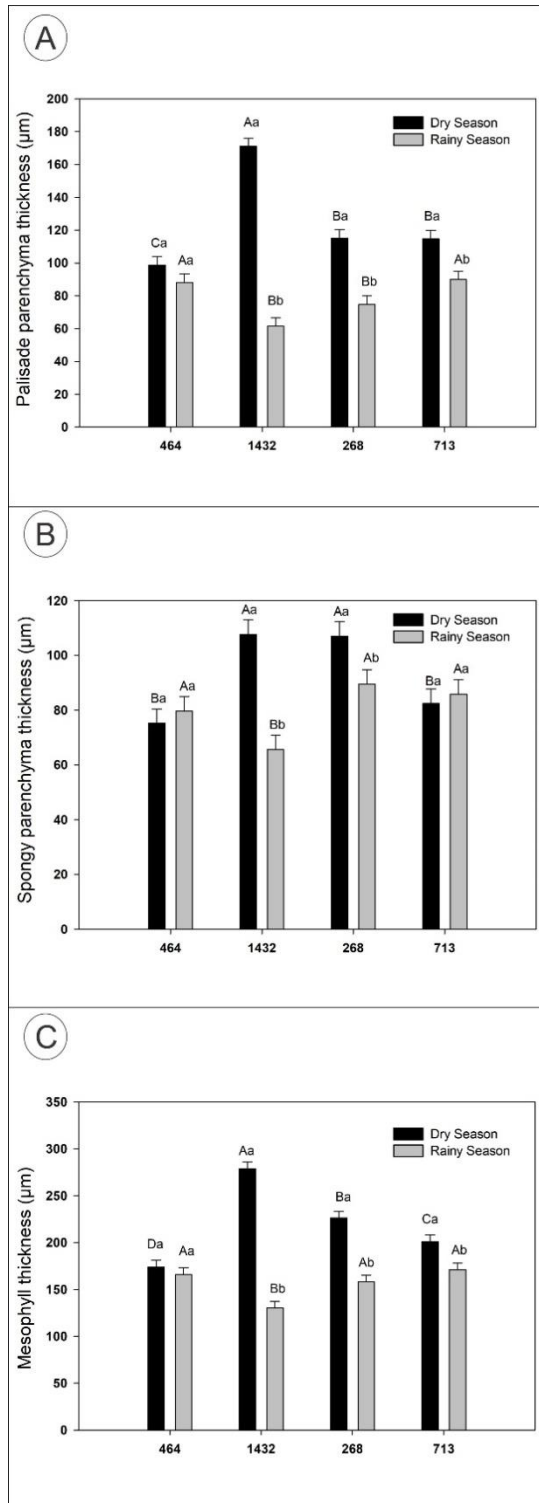


Figura 6. Características anatómicas da folha em seção transversal da batata-doce dos genótipos (464/ 1432/268/713) sob duas estações: seca e chuvosa. As Médias seguidas de letras iguais, maiúscula para a condição de estação e minúscula para o genótipo, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Barras = Erro padrão.

Na espessura do parênquima esponjoso houve um aumento na estação seca para os genótipos 1432 e 268 (Fig. 6b e 7e, f). No entanto, nas condições de estação chuvosa os genótipos 464, 268 e 713 obtiveram maiores valores para esta variável (Fig. 6b e 7b, c, d). Comparando entre as estações o parênquima esponjoso não mostrou mudança significativa para os genótipos 464 e 713 (Fig. 6b).

A estação seca influenciou na redução da espessura do mesofilo no genótipo 464 na estação seca em comparação aos genótipos analisados (Fig. 6c e 7d, h). No entanto, a espessura do mesofilo do genótipo 464 não mostrou mudança significativa entre as estações (Fig. 6c e 7d, h). Para esta variável na seca o genótipo 1432 ocorreu maior espessura do mesofilo (Fig. 6c e 7e). Na estação chuvosa, os genótipos 464, 268 e 713 ocorreu maior espessura em seu mesofilo (Fig. 6c).

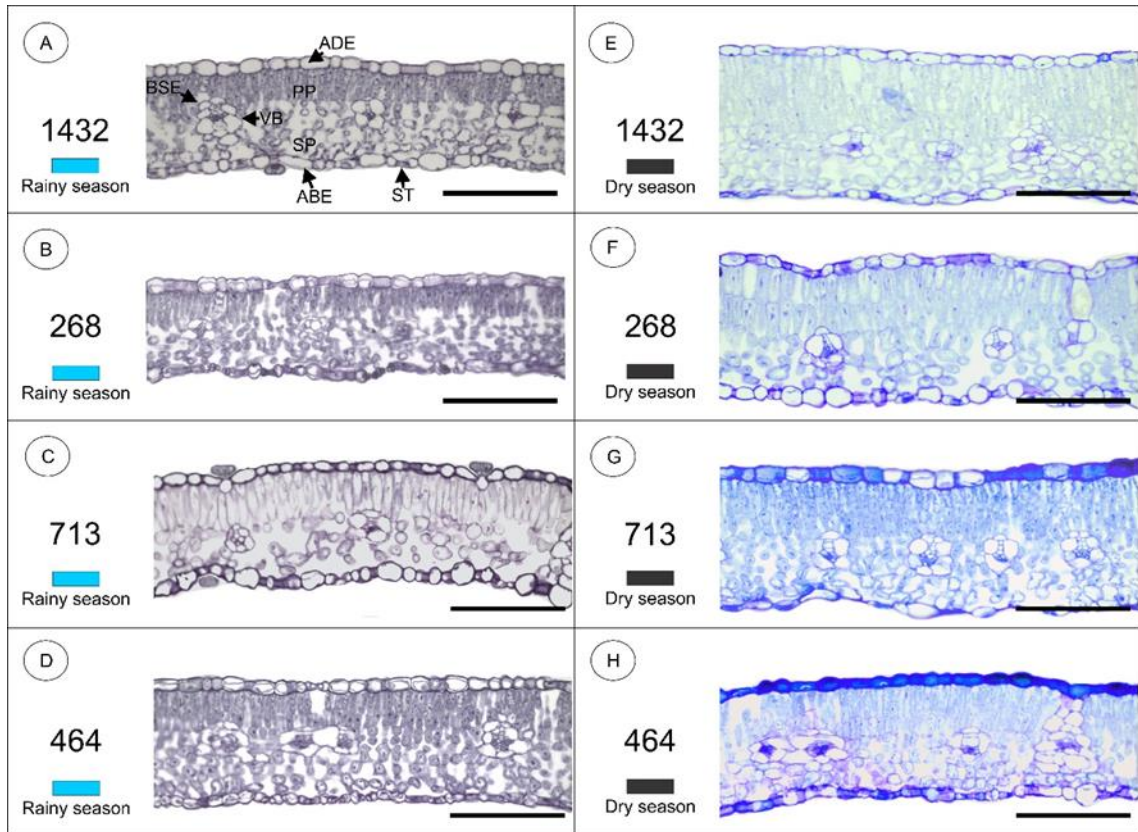


Figura 7. Características anatômicas da folha em seção transversal da batata-doce dos genótipos (464/1432/268/713) sob duas estações: chuvosa e seca. ADE, epiderme adaxial; ABE, epiderme abaxial; BSE, extensão da bainha do feixe; VB, feixe vascular; PP, parênquima paliçádico; SP, parênquima esponjoso; ST, estômato. Barra 200 μm .

Características anatômicas importantes podem ser percebidas em todos os genótipos em análise entre as estações, como a área do feixe vascular para ambos genótipos na estação seca teve um aumento significativo comparando com a estação chuvosa (Fig. 8a). No entanto o diâmetro do metaxilema na estação chuvosa teve um aumento significativo na maioria dos genótipos, sendo que o genótipo 464 e 713 obteve um maior aumento em seu diâmetro. Na estação seca não houve diferenças significativa entre os genótipos analisados (fig. 8b).

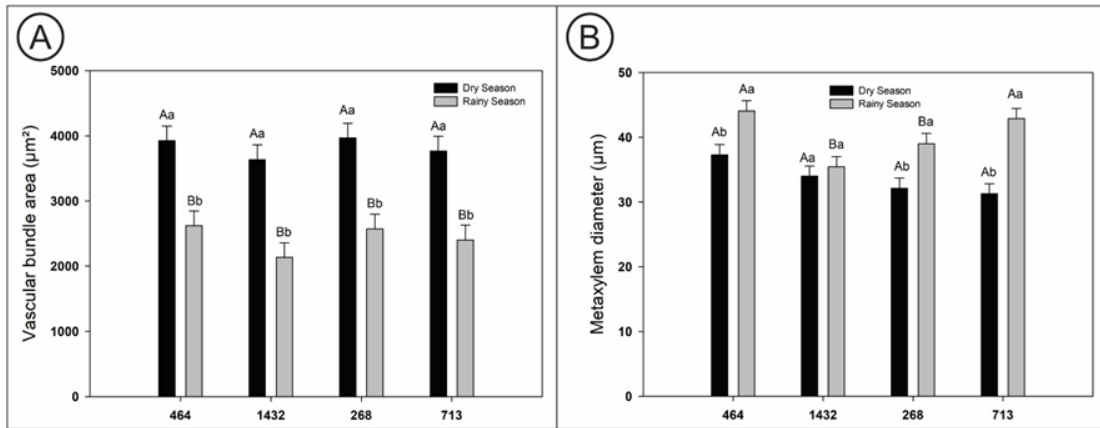


Figura 8. Características anatômicas do feixe vascular em seção transversal da batata-doce dos genótipos (464/ 1432/268/713) sob duas estações: seca e chuvosa. As Médias seguidas de letras iguais, maiúscula para a condição de estação e minúscula para o genótipo, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$).

3.4 RPDI

Em relação ao RDPI, o genótipo 268 apresentou 62,0% das características fenotípicas contrastantes. No entanto, o genótipo 1432 apresentou apenas em 18,0 % dos caracteres fenotípicos. O RDPI foi menor para os genótipos 713 (10%) e 464 (10%) (Fig. 9a, b, c).

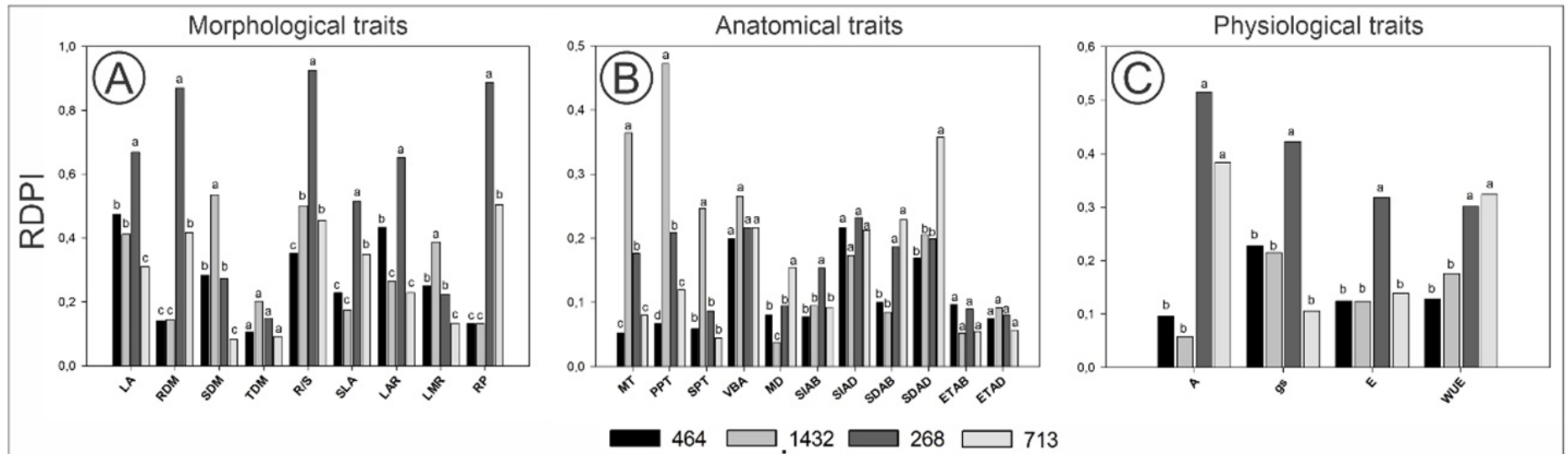


Figura 9. Índice de plasticidade de distância relativa (IPDR) nos genótipos (464/ 1432/268/713). (A) Características morfológicas, (B) Características anatômicas, (C) Características fisiológicas. Médias com as mesmas letras entre os genótipos são significativamente diferentes entre si pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). LA: Área foliar, RDM: Massa seca da raiz, SDM: Massa seca da parte aérea, TDM: Massa seca total; R/S: Razão raiz/parte aérea, SLA: Área foliar específica, LAR: Razão área foliar, LMR: Razão massa foliar, RP: Produtividade total de raiz, MT: Espessura do mesofilo, PPT: Espessura do parênquima paliçádico, SPT: Espessura do parênquima esponjoso, VBA: Área do feixe vascular, MD: Diâmetro metaxilema, SIAB: Índice estomático abaxial, SIAD: Índice estomático adaxial, SDAB: Densidade estomática abaxial, SDAD: Densidade estomática adaxial, ETAB: Espessura da epiderme abaxial, ETAD: Espessura da epiderme adaxial, A: Taxa de assimilação líquida, gs: condutância estomática, E: transpiração, WUE: eficiência no uso da água.

4 DISCUSSÃO

Durante a primeira etapa do experimento, o crescimento das plantas foi afetado pela escassez de chuva e outros fatores limitantes, como baixas precipitações, umidade relativa do ar reduzida e alta taxa de irradiação solar em comparação com a estação chuvosa (Figura 1). Os genótipos 464 e 1432 cultivados entre as estações demonstraram variações significativas em relação às características ao crescimento, estrutura anatômica, trocas gasosas foliares e produtividade. Notavelmente, os genótipos 464 e 1432 demonstraram resultados proeminentes durante a estação de baixa disponibilidade hídrica. Mesmo com baixas precipitações na estação seca, esses genótipos exibiram alta taxa fotossintética, maior produtividade e maior alocação de recursos para o sistema radicular. Esses aspectos estão intimamente ligados a respostas morfoanatômicas, fisiológicas e ao seu desempenho produtivo.

As plantas quando submetidas a baixas precipitações, cessam seu crescimento, e grande parte dos processos e assimilados das plantas são desviados para a sobrevivência ou para garantir um ciclo reprodutivo bem-sucedido (Chadha et al., 2019). Essa estratégia de tolerar a baixa disponibilidade hídrica relacionado aos genótipos 464 e 1432, reduzindo o tamanho da área foliar e biomassa da parte aérea, resulta em uma diminuição da perda de água pelo processo de transpiração e esta redução foliar é atribuível à inibição da expansão foliar pela diminuição da taxa de divisão celular, o que resulta na perda de turgidez celular (Bangar et al., 2019) (Figs. 1a, c, 2b, d).

Segundo, Motsa et al., (2015), observaram que as variedades de batata-doce têm uma notável capacidade de modificar suas características de crescimento, especialmente no que diz respeito ao desenvolvimento de um sistema radicular robusto. Elas conseguem se adaptar a condições de baixa disponibilidade de recursos, demonstrando uma resistência moderada ao estresse causado pela seca por meio de uma maior plasticidade fenotípica (Pires et al., 2020). Portanto nosso estudo mostra esta avaliação do genótipo 464 e 1432 que sua massa seca de raiz e razão raiz/parte aérea ocorreu um aumento significativo mostrando que o particionamento da matéria seca e a distribuição temporal da biomassa ao sistema radicular garantindo assim maior produtividade mesmo na estação seca (Figs. 1b, 2c, 3). O sistema radicular maior dos genótipos 464 e 1432 aumenta a resistência à seca e o rendimento das raízes da batata-doce devido à absorção máxima de nutrientes minerais e água (Naawe et al., 2021) e aumenta a produção da biomassa vegetal (Zulfiqar et al., 2020). Conforme observado por Lavinsky et al., (2015), a habilidade de sustentar a produção de biomassa representa uma das características-chave das plantas que demonstram resistência à seca, conforme observado neste estudo.

A área foliar específica do genótipo 1432 obteve maiores taxas na estação seca em relação aos genótipos e estações, isso indica a eficiência com que as plantas utilizaram suas folhas para produzir biomassa, sendo que também para sua produtividade (fig. 3a e 4). Portanto, um aumento nessa taxa representa consistentemente maior área disponível para absorção da radiação solar (Widaryanto; Saitama, 2017), que normalmente é direcionada para o processo fotossintético que envolve a fixação do carbono, fornecendo energia para biossíntese, manutenção e incorporação na biomassa da planta. No entanto, a razão de massa foliar do genótipo 464 e 1432 apresentaram valores menores o que significa uma maior proporção de biomassa acumulada em tecidos não fotossintéticos (raízes) durante a estação seca (fig. 3d).

A característica anatômica relacionada aos genótipos 464 e 1432 devido a sua alta taxa fotossintética líquida e maior produtividade durante a estação com menos disponibilidade hídrica, o que foram observados nas folhas em resposta à seca são importantes para sua adaptação e são utilizados na seleção de cultivares (Gunnula et al., 2022). O genótipo 1432, o crescimento do mesofilo, parênquima paliçádico e esponjoso, bem como a redução no tamanho das folhas, são formas de aumentar a capacidade das plantas de armazenar água e minimizar a perda de água e aumentando ao mesmo tempo a capacidade da planta de absorver CO₂ (Yavas et al., 2023a) (Figs. 6a, b, c). Se uma planta tiver alta resistência à seca, tendem a ter alguns fenótipos comuns, como folhas menores e mais grossas e parênquima paliçádico bem desenvolvido, isso mostra que as perdas de biomassa serão menores, (Wang et al., 2021). Sendo assim, componentes específicos do mesofilo como o parênquima paliçádico desempenham um papel importante na fotossíntese, pois determinam o fluxo e a distribuição de fótons nas folhas, limitando o mesofilo à difusão de CO₂ aos locais de carboxilação nos cloroplastos, especialmente sob condições de estresse, uma perspectiva para melhorar sua alta produtividade (Velikova et al., 2020a).

Para o genótipo 464 não ocorreu diferenças para anatomia foliar sendo espessura do parênquima paliçádico, esponjoso e mesofilo nas estações analisadas, (Fig. 6a, b, c), porém o genótipo mesmo com alta taxa fotossintética líquida (A), as suas células mantiveram seu tamanho proporcional mesmo na estação seca e chuvosa. Podendo ser mais uma estratégia para manter o estado hídrico, mantendo o turgor foliar sob estação seca (Anjum et al., 2011). Esses mecanismos visam aumentar o crescimento radicular e reduzir o crescimento foliar e caulinar, como mostra neste estudo para o genótipo 464, pois são os efeitos do estresse no crescimento das plantas (Naawe et al., 2021).

As respostas fenotípicas de resistência a baixas precipitações dos genótipos 464 e 1432 foram registradas e explicadas pela variação da razão raiz/parte aérea, fotossíntese líquida,

massa seca total, anatomia do mesófilo, produtividade. O potencial de rendimento e a resistência ao estresse aumentada são características associadas (Lopes et al., 2011). Estas informações poderão ser relevantes para o desenvolvimento de programas de melhoramento de batata-doce, adaptando esta cultura às alterações climáticas.

Neste estudo, para os genótipos 268 e 713 observamos que na estação seca com baixas precipitações, onde ocorreram menores taxas de crescimento, tais como, massa seca da raiz, massa seca total, razão raiz/parte aérea, produtividade e menores taxas fotossintéticas (Figs. 1a, b, c, d e 2c, 3 e 4a). A baixa disponibilidade hídrica induz o fechamento estomático e diminui a condutância, como consequência, reduz a taxa fotossintética, onde a absorção total de carbono é reduzida, levando a redução da biomassa da planta como mostra nos resultados desses genótipos (Peters et al., 2018).

Para esses genótipos 268 e 713, o *WUE* na estação seca foi menor em relação a estação chuvosa. Mesmo *A* e *WUE* sendo uma característica de alta plasticidade fenotípica nesses genótipos (Fig. 9c), contudo, na maioria das situações de baixas precipitações, onde as culturas dependem de chuvas sazonais imprevisíveis, a maximização da utilização da humidade do solo é um componente crucial da resistência à seca. Segundo Blum, (2009), a *WUE* é o alvo da melhoria do rendimento das culturas sob baixa disponibilidade de água. Portanto, o aumento da produção de biomassa sob déficit hídrico pode ser alcançado principalmente pela maximização da captação de água no solo enquanto desvia a maior parte da umidade do solo disponível para a evapotranspiração, isso explica a biomassa desses genótipos não está relacionada a plasticidade de *WUE* que resultou em uma relação negativa com um menor rendimento, essa medida é mas positiva para algumas medidas adotadas para ter resistência à seca por um certo período de tempo (Pires et al., 2020). A literatura atual indica que as características fenotípicas de resistência a baixas precipitações raramente priorizam o alto rendimento, como a plasticidade fenotípica de *WUE* elevada, que é em grande parte uma função da redução do uso de água e não de uma melhoria líquida na produção vegetal ou na bioquímica da assimilação (Blum, 2005).

A anatomia foliar como a espessura da epiderme, mostraram um aumento na face abaxial para os genótipos 268 e 713 e adaxial para o genótipo 268 sob estação seca (Fig. 6c e d). Tal mudança, na espessura da epiderme, provavelmente, está relacionada com a defesa da planta contra dessecação e proteção às células parenquimáticas clorofiladas, sendo estas como características de plantas que tem resistência a baixas precipitações (Oliveira et al., 2014). As plasticidades fenotípicas de resistência à seca como mostrados pelo genótipo 268, provavelmente nem sempre estão relacionados ao potencial produtivo. E o genótipo 713 teve

menos plasticidade fenotípica com poucas características de resistência a seca e baixo potencial produtivo. Certamente são genótipos que não tem características anatômicas e morfofisiológicas proeminentes para programas de melhoramento genético.

5 CONCLUSÃO

Os genótipos de batata-doce 464 e 1432 apresentam características fenotípicas anatômicas e morfofisiológicas que os agrupam como genótipos de resistência a baixas precipitações como na estação seca. Os genótipos 464 e 1432 destacam-se por ter características de alta produtividade, alta eficiência do uso da água, taxa de assimilação líquida, bem como características anatômicas do mesófilo favoráveis a estação seca ao controle da transpiração, fotossíntese e maior biomassa. E os genótipos 268 e 713 como opostos a estas características e necessitando de maior disponibilidade de água. Mesmo o genótipo 268 apresentando maior plasticidade fenotípica para algumas características de resistência a seca, provavelmente está plasticidade não estão relacionados ao seu potencial produtivo.

REFERÊNCIAS

- Amante, C., Esposito, T., Luccheo, G., Luccheo, L., Russo, P., & Del Gaudio, P. (2022). **A Novel Mixture Based on Bergamot, Ipomoea Batatas, Policosanol Extracts and Liposomal Berberine for the Treatment of Hypercholesterolemia.** *Life*, 12(8), 1162. <https://doi.org/10.3390/life12081162>.
- Anjum, S. A., Xie, X.-Y., Wang, L.-C., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. (2026). **Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress.** *African Journal of Agricultural Research*, 6(9). <https://doi.org/10.5897/AJAR10.027>.
- Bahadur, V., Chauhan, S., Behera, S., Pati, K., & Bansode, V. (n.d.). **Breeding for Drought Tolerance in Sweet Potato (Ipomoea batatas L.).** <https://www.researchgate.net/publication/356718188>.
- Bangar, P., Chaudhury, A., Tiwari, B., Kumar, S., & Kumari, R. (2019). **Morphophysiological and biochemical response of mungbean [Vigna radiata (L.) Wilczek] varieties at different developmental stages under drought stress.** *TURKISH JOURNAL OF BIOLOGY*, 43(1), 58–69. <https://doi.org/10.3906/biy-1801-64>.
- Bertolino, L. T., Caine, R. S., & Gray, J. E. (2019). **Impact of Stomatal Density and Morphology on Water-Use Efficiency in a Changing World.** *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00225>.
- Blum, A. (2005). **Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive?** *Australian Journal of Agricultural Research*, 56(11), 1159. <https://doi.org/10.1071/AR05069>.
- Blum, A. (2009). **Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress.** *Field Crops Research*, 112(2–3), 119–123. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.03.009>.
- Chadha, A., Florentine, S. K., Chauhan, B. S., Long, B., & Jayasundera, M. (2019). **Influence of soil moisture regimes on growth, photosynthetic capacity, leaf biochemistry and reproductive capabilities of the invasive agronomic weed; Lactuca serriola.** *PLOS ONE*, 14(6), e0218191. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218191>.
- Chandrasekara, A., & Josheph Kumar, T. (2016). **Roots and Tuber Crops as Functional Foods: A Review on Phytochemical Constituents and Their Potential Health Benefits.** *International Journal of Food Science*, 2016, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2016/3631647>.
- Costa, A. L. da, Andrade Júnior, V. C. de, Gama, A. B. N. da, Silva, E. A. da, Brito, O. G., Silva, J. C. de O., & Bueno Filho, J. S. de S. (2022). **Selection of superior sweet potato genotypes for human consumption via mixed models.** *Bragantia*, 81. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20220075>.
- Delazari, F. T., Assis, I. R., Cabrera, D. F. V., Ferreira, M. G., Dias, L. E., Rueda, A., Zanoncio, J. C., & Silva, D. J. H. (2018). **Morpho-physiological characteristics by sweet potato cultivars as function of irrigation depth.** *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 90(4), 3541–3549. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820170687>.
- Driesen, E., Van den Ende, W., De Proft, M., & Saeys, W. (2020). **Influence of Environmental Factors Light, CO₂, Temperature, and Relative Humidity on Stomatal**

Opening and Development: A Review. *Agronomy*, 10(12), 1975.
<https://doi.org/10.3390/agronomy10121975>.

Feder, N., & O'Brien, T. P. (1968). **Plant microtechnique: some principles and new methods.** *American Journal of Botany*, 55(1), 123–142. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1968.tb06952.x>.

Ferreira, D. F. (2011). **Sisvar: a computer statistical analysis system.** *Ciência e Agrotecnologia*, 35(6), 1039–1042. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>.

Gajanayake, B., Reddy, K. R., Shankle, M. W., & Arancibia, R. A. (2013). **Early-season Soil Moisture Deficit Reduces Sweetpotato Storage Root Initiation and Development.** *HortScience*, 48(12), 1457–1462. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.12.1457>.

Gonçalves Neto, Á. C., Maluf, W. R., Gomes, L. A. A., Maciel, G. M., Ferreira, R. de P. D., & Carvalho, R. de C. (2012). **Correlação entre caracteres e estimação de parâmetros populacionais para batata-doce.** *Horticultura Brasileira*, 30(4), 713–719. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362012000400025>.

Gunnula, W., Kanawapee, N., Somta, P., & Phansak, P. (2022). **Evaluating Anatomical Characteristics Associated With Leaf Rolling in Northeastern Thai Rice Cultivars During Drought by Decision Tree.** *Acta Agrobotanica*, 75. <https://doi.org/10.5586/aa.7510>.

Huan, L., Jin-qiang, W., & Qing, L. (2020). **Photosynthesis product allocation and yield in sweet potato with spraying exogenous hormones under drought stress.** *Journal of Plant Physiology*, 253, 153265. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153265>.

Huang, C., Yu, M., Sun, L., Qin, N., & Wei, L. (2020). **Physiological responses of sweet potato seedlings under drought-stress conditions with selenium applications.** *Journal of Agricultural and Crop Research*, 8(5), 98 – 112. https://doi.org/10.33495/jacr_v8i5.20.129.

Kato, K., Nagane, M., Aihara, N., Kamiie, J., Miyanabe, M., Hiraki, S., Luo, X., Nakanishi, I., Shoji, Y., Matsumoto, K., & Yamashita, T. (2021). **Lipid-soluble polyphenols from sweet potato exert antitumor activity and enhance chemosensitivity in breast cancer.** *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, 68(3), 193–200. <https://doi.org/10.3164/jcbtn.20-73>.

Kraus, Jane Elizabeth e Arduin, Marcos. **Manual básico de métodos em morfologia vegetal.** Seropédica: EDUR. . Acesso em: 24 fev. 2024., 1997.

Lavinsky, A. O., Magalhães, P. C., Ávila, R. G., Diniz, M. M., & de Souza, T. C. (2015). **Partitioning between primary and secondary metabolism of carbon allocated to roots in four maize genotypes under water deficit and its effects on productivity.** *The Crop Journal*, 3(5), 379–386. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.04.008>.

Lee, J. H., Woo, K. S., Lee, H.-U., Nam, S. S., Lee, B. W., Lee, Y.-Y., Lee, B., & Kim, H.-J. (2019). **Intracellular Reactive Oxygen Species (ROS) Removal and Cytoprotection Effects of Sweet Potatoes of Various Flesh Colors and Their Polyphenols, Including Anthocyanin.** *Preventive Nutrition and Food Science*, 24(3), 293–298. <https://doi.org/10.3746/pnf.2019.24.3.293>.

Lopes, M. S., Araus, J. L., van Heerden, P. D. R., & Foyer, C. H. (2011). **Enhancing drought tolerance in C4 crops.** *Journal of Experimental Botany*, 62(9), 3135–3153. <https://doi.org/10.1093/jxb/err105>.

- Majid, M., Nasir, B., Zahra, S. S., Khan, M. R., Mirza, B., & Haq, I. (2018). **Ipomoea batatas L. Lam. ameliorates acute and chronic inflammations by suppressing inflammatory mediators, a comprehensive exploration using in vitro and in vivo models.** *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 18(1), 216. <https://doi.org/10.1186/s12906-018-2279-5>.
- Marchiori, P. E. R., Machado, E. C., Sales, C. R. G., Espinoza-Núñez, E., Magalhães Filho, J. R., Souza, G. M., Pires, R. C. M., & Ribeiro, R. V. (2017). **Physiological Plasticity Is Important for Maintaining Sugarcane Growth under Water Deficit.** *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02148>.
- Motsa, N. M., Modi, A. T., & Mabhaudhi, T. (2015). **Sweet potato (Ipomoea batatas L.) as a drought tolerant and food security crop.** *South African Journal of Science*, 111(11/12), 8. <https://doi.org/10.17159/sajs.2015/20140252>.
- Naawe, E. K., Ibrahim Ibrahim, S., Köken, İ., Demirel, U., & Çaliskan, E. (2021). **A review: morphological, physiological and molecular responses of sweetpotato to drought.** In *Eurasian J. Sci. Eng. Tech* (Vol. 2, Issue 2).
- Oliveira, N. K., Mauro De Castro, E., Guimarães, R. J., Pieve, L. M., Pereira Baliza, D., Lopes Machado, J., & Freitas, T. (n.d.). **Anatomia foliar de cafeeiros implantados com o uso de polímero hidrorretentor.** In *Coffee Science* (Issue 2).
- Peters, W., van der Velde, I. R., van Schaik, E., Miller, J. B., Ciais, P., Duarte, H. F., van der Laan-Luijkx, I. T., van der Molen, M. K., Scholze, M., Schaefer, K., Vidale, P. L., Verhoef, A., Wårlind, D., Zhu, D., Tans, P. P., Vaughn, B., & White, J. W. C. (2018). **Increased water-use efficiency and reduced CO₂ uptake by plants during droughts at a continental scale.** *Nature Geoscience*, 11(10), 744–748. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0212-7>.
- Pires, M. V., de Castro, E. M., de Freitas, B. S. M., Souza Lira, J. M., Magalhães, P. C., & Pereira, M. P. (2020). **Yield-related phenotypic traits of drought resistant maize genotypes.** *Environmental and Experimental Botany*, 171, 103962. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103962>.
- Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais.** 5ª Aproximação, Viçosa: CFSEMG, 1999. 25-32 p.
- Sapakhova, Z., Raissova, N., Daurov, D., Zhapar, K., Daurova, A., Zhigailov, A., Zhambakin, K., & Shamekova, M. (2023). **Sweet Potato as a Key Crop for Food Security under the Conditions of Global Climate Change: A Review.** *Plants*, 12(13), 2516. <https://doi.org/10.3390/plants12132516>.
- Shao, H. H., Chen, S. D., Zhang, K., Cao, Q. H., Zhou, H., Ma, Q. Q., He, B., Yuan, X. H., Wang, Y., Chen, Y. H., & Yong, B. (2014). **Isolation and expression studies of the ERD15 gene involved in drought-stressed responses.** *Genetics and Molecular Research*, 13(4), 10852–10862. <https://doi.org/10.4238/2014.December.19.6>.
- Valladares, F., Sanchez-Gomez, D., & Zavala, M. A. (2006). **Quantitative estimation of phenotypic plasticity: bridging the gap between the evolutionary concept and its ecological applications.** *Journal of Ecology*, 94(6), 1103–1116. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01176.x>.

- Van Heerden, P. D. R., & Laurie, R. (2008). **Effects of prolonged restriction in water supply on photosynthesis, shoot development and storage root yield in sweet potato.** *Physiologia Plantarum*, 134(1), 99–109. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01111.x>.
- Velikova, V., Arena, C., Izzo, L. G., Tsonev, T., Koleva, D., Tattini, M., Roeva, O., De Maio, A., & Loreto, F. (2020). **Functional and Structural Leaf Plasticity Determine Photosynthetic Performances during Drought Stress and Recovery in Two *Platanus orientalis* Populations from Contrasting Habitats.** *International Journal of Molecular Sciences*, 21(11), 3912. <https://doi.org/10.3390/ijms21113912>.
- Wang, J., Li, C., Li, L., Reynolds, M., Mao, X., & Jing, R. (2021). **Exploitation of Drought Tolerance-Related Genes for Crop Improvement.** *International Journal of Molecular Sciences*, 22(19), 10265. <https://doi.org/10.3390/ijms221910265>.
- Widaryanto, E., & Saitama, A. (2017). **Analysis of Plant Growth of Ten Varieties of Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) Cultivated in Rainy Season.** *Asian Journal of Plant Sciences*, 16(4), 193–199. <https://doi.org/10.3923/ajps.2017.193.199>.
- Xoconostle, B., Arturo Ram, F., Flores-Ele, L., & Ruiz-Medra, R. (2010). **Drought Tolerance in Crop Plants.** *American Journal of Plant Physiology*, 5(5), 241–256. <https://doi.org/10.3923/ajpp.2010.241.256>.
- Yavas, I., Jamal, M. A., Ul Din, K., Ali, S., Hussain, S., & Farooq, M. (2023). **Drought-Induced Changes in Leaf Morphology and Anatomy: Overview, Implications and Perspectives.** *Polish Journal of Environmental Studies*. <https://doi.org/10.15244/pjoes/174476>.
- Zhou, M., Sun, Y., Wang, S., Liu, Q., & Li, H. (2023). **Photosynthesis Product Allocation and Yield in Sweet Potato in Response to Different Late-Season Irrigation Levels.** *Plants*, 12(9), 1780. <https://doi.org/10.3390/plants12091780>.
- Zulfiqar, F., Younis, A., Riaz, A., Mansoor, F., Hameed, M., Akram, N. A., & Abideen, Z. (2020). **Morpho-anatomical adaptations of two *Tagetes erecta* L. cultivars with contrasting response to drought stress.** *Pakistan Journal of Botany*, 52(3). [https://doi.org/10.30848/PJB2020-3\(35\)](https://doi.org/10.30848/PJB2020-3(35)).

ARTIGO 2: CARACTERÍSTICAS MORFOANATÔMICAS E FISIOLÓGICAS DE GENÓTIPOS DE TRIGO SOB DÉFICIT HÍDRICO

RESUMO

Considerando a relevância do estresse abiótico na agricultura global para a produção de alimentos, a identificação e caracterização das alterações de tolerância e sensibilidade dos genótipos de trigo, tanto irrigados quanto de sequeiro, diante do déficit hídrico, pode contribuir significativamente para compreender as modificações anatômicas e morfofisiológicas envolvidas na adaptação à seca. Isso, por sua vez, facilita a seleção de variedades mais competitivas, que exibem fenótipos desejáveis em condições de seca, e podem ser utilizadas em programas de melhoramento genético para aprimorar as características do germoplasma. Diante ao exposto, no presente trabalho, o objetivo foi avaliar as modificações anatômicas e morfofisiológicas dos genótipos de trigo com diferentes biotipos sob deficiência hídrica, que contribuem na identificação da tolerância ou sensibilidade à seca. O estudo foi desenvolvido sob condições controladas, em casa de vegetação, no delineamento inteiramente casualizado, com 12 tratamentos (duas condições hídricas e seis genótipos), em esquema fatorial (2x6), e com cinco repetições e uma planta por vaso. Os genótipos do biotipo sequeiro BRS 404 e MGS Brilhante e os biotipos irrigados BRS 264, Tbio Duque, Tbio Aton e ORS Feroz, suas características morfofisiológicas e anatômicas apresentadas pelo déficit hídrico com a capacidade de campo a 30%, resultou em um aumento nas características como na eficiência no uso da água, anatômicas como a densidade estomática adaxial/abaxial, densidade de células epidérmicas abaxial/adaxial, área do feixe vascular, área do floema. Estas características descritas acima foram apresentadas para todos os genótipos do biotipo sequeiro e irrigado em estudo, apesar de estar mais relacionadas as plantas resistentes que evitam a desidratação, essas características são importantes para o cultivo onde ocorre um período bem curto de déficit hídrico e com capacidade de campo maior que 30%, pois elas evitam e não toleram o estresse pelos baixos rendimentos morfológicos e fisiológicos a 30% de capacidade de campo.

Palavras-chave: *Triticum aestivum* L., anatomia foliar, trocas gasosas, déficit hídrico.

MORPHOANATOMICAL AND PHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF WHEAT GENOTYPES UNDER WATER DEFICIT

ABSTRACT

Considering the relevance of abiotic stress in global agriculture for food production, identifying and characterizing the tolerance and sensitivity alterations of wheat genotypes, both irrigated and rainfed, to water deficit can significantly contribute to understanding the anatomical and morphophysiological changes involved in drought adaptation. This, in turn, facilitates the selection of more competitive varieties that exhibit desirable phenotypes under drought conditions and can be used in breeding programs to enhance germplasm characteristics. In this context, the objective of this study was to evaluate the anatomical and morphophysiological modifications of wheat genotypes with different biotypes under water deficiency, contributing to the identification of drought tolerance or sensitivity. The study was conducted under controlled conditions in a greenhouse, using a completely randomized design with 12 treatments (two water conditions and six genotypes), arranged in a factorial scheme (2x6), with five replications and one plant per pot. The rainfed biotype genotypes BRS 404 and MGS Brilhante, and the irrigated biotype genotypes BRS 264, Tbio Duque, Tbio Aton, and ORS Feroz, exhibited morphological, physiological, and anatomical characteristics under water deficit with field capacity at 30%, resulting in an increase in traits such as water use efficiency, anatomical traits like adaxial/abaxial stomatal density, abaxial/adaxial epidermal cell density, vascular bundle area, and phloem area. These characteristics were observed in all genotypes studied, both rainfed and irrigated, although more related to resistant plants that avoid dehydration. These traits are important for cultivation where there is a short period of water deficit and a field capacity greater than 30%, as they prevent and do not tolerate stress due to low morphological and physiological yields at 30% field capacity.

Keywords: *Triticum aestivum* L., leaf anatomy, gas exchange, water deficit.

1 INTRODUÇÃO

O trigo desempenha um papel crucial na segurança alimentar global e, portanto, há uma necessidade constante de aumentar a sua produtividade, dado o crescimento contínuo da população mundial (Erenstein et al., 2022). Portanto, para aumentar produção e garantir a autossuficiência da cultivar, é essencial procurar soluções potencialmente apropriadas para as regiões agrícolas (Ribeiro et al., 2012).

A produtividade do trigo pode estar em risco pela incidência imprevisível de eventos climáticos agudos, como seca, calor, salinidade e CO₂ elevado (Porter et al., 2019). Estes fatores afetam negativamente a qualidade do trigo e a economia alimentar global. As mudanças climáticas representam um grande desafio para fornecer de forma consistente o trigo de qualidade no futuro, devido à interação multifacetada entre o CO₂, as ondas de calor e os padrões de chuva. As fases reprodutivas iniciais podem ser prejudicadas, podendo afetar o desenvolvimento do grão e flutuações na composição final (Dolferus et al., 2011). O trigo é a principal cultura em todo o mundo e é frequentemente exposto a um déficit hídrico, especialmente durante a germinação das sementes e a fase de estabelecimento da cultura no início do outono (Kartseva et al., 2021). No cenário de mudança climática global, o déficit hídrico aumentará em frequência e severidade, tornando-se assim um grande problema para o crescimento e a produção de plantas cultivadas, incluindo o trigo (Leng; Hall, 2019).

Existem mecanismos conhecidos que reduzem os efeitos negativos do déficit hídrico nas plantas, como por exemplo, os mecanismos de prevenção e tolerância ao estresse. Evitar o estresse refere-se à capacidade de uma planta de sustentar o alto potencial hídrico de seus tecidos sob déficit hídrico. As plantas atingem esses níveis aumentando a absorção de água através de sistemas radiculares profundos ou reduzindo as perdas por transpiração através de folhas finas ou carnudas com tecidos especializados para reter água (Kapoor et al., 2020). Plantas com maior resistência à seca geralmente apresentam estruturas xeromórficas, como folhas menores e mais espessas, parênquima clorofiliano mais desenvolvido e espaços intercelulares, mais tricomas epidérmicos, estômatos menores e mais densos, epiderme de cutícula mais espessa e feixe vascular mais desenvolvido (Fang; Xiong, 2015).

O déficit hídrico altera a anatomia, fisiologia e morfologia das plantas, de acordo com a intensidade e o tempo de exposição (Fahad et al., 2017). Além disso, a pré-floração, os estágios de floração e enchimento de grãos são os mais sensíveis, podendo ocasionar diminuição no rendimento em até 50% (Majid et al., 2007). Portanto, é de suma importância explorar a capacidade das espécies agrícolas que crescerem em condições de déficit hídrico.

Na cultura do trigo, o índice de área foliar em diferentes estádios fenológicos tem diferentes efeitos sobre a produtividade (Zhou et al., 2020). No déficit hídrico causa a redução nos tecidos do mesofilo, xilema e floema retarda a taxa da translocação de fotoassimilados e do acúmulo de água necessária para a fotossíntese (Hassan et al., 2017). Além disso, melhorar a fotossíntese em plantas cultivadas é uma adição administrável e útil à engenharia genética para aumentar o potencial das culturas (Furbank et al., 2020). Os esforços atuais estão focados no desenvolvimento, avaliação e estudo de novos genótipos de culturas com maior tolerância à seca para aumentar a produção de alimentos (Abdelkader et al., 2022). Especificamente, durante o período de entressafra, quando há períodos de seca e uma diminuição progressiva na precipitação, é essencial obter genótipos com tolerâncias à seca. Assim, é necessário identificar genótipos que pode se adaptar ao déficit hídrico e manter a produtividade (Munns et al., 2010).

Considerando a importância do impacto do estresse abiótico na agricultura global, e para garantir a segurança alimentar, novos programas de melhoramento começaram a ser desenvolvidos e implementados utilizando o conhecimento das respostas anatômicas e morfológicas das plantas (Kapoor et al., 2020). O melhoramento agrônomico tradicional é uma alternativa, com o intuito de melhorar as características genéticas do germoplasma, através de melhorias na tolerância/resistência das plantas a estresses abióticos/bióticos. Assim, a identificação e a caracterização destas modificações de tolerância e sensibilidade dos genótipos de trigo do biótipo irrigados e sequeiro sob a deficiência hídrica, podem contribuir no entendimento dos tipos de modificações anatômicas e morfológicas envolvidas na tolerância ou evitação à seca, auxiliando para a seleção de variedades mais competitivas, servindo como um fenótipo desejável nas condições de seca que poderá ser usado em programas de melhoramento genético. Diante ao exposto, no presente trabalho, o objetivo foi avaliar quais as modificações morfoanatômicas e fisiológicas dos genótipos de trigo com diferentes biótipos no estágio reprodutivo sob deficiência hídrica, que contribuem na identificação da tolerância ou sensibilidade à seca.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local de execução

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, localizada no Departamento de Ciências do Solo e nos Laboratórios de Anatomia Vegetal do Departamento de Biologia, situados na Universidade Federal de Lavras (UFLA).

2.2 Material Vegetal

Os materiais vegetais constituíram de seis genótipos de trigo contrastantes em relação às regiões de adaptação (Rocca da Cunha; Caierão, 2022). Os genótipos de trigo utilizados estão apresentados na (Tabela 1).

Tabela 1. Genótipos utilizados, origem, instituição responsável, região onde são indicados para o cultivo e classe comercial.

Genótipos	Ciclo	Instituição/ano de lançamento	Regiões de Adaptação	Classe comercial indicativa
BRS 404	Precoce/Médio	EMBRAPA/2015	Sequeiro	Pão
BRS 264	Precoce	EMBRAPA/2005	Irrigado	Pão
MGS Brilhante	Precoce	EPAMIG/2005	Sequeiro	Pão
Tbio Aton	Médio	BIOTRIGO/2018	Irrigado/Sequeiro	Pão
Tbio Duque	Precoce	BIOTRIGO/2017	Irrigado/Sequeiro	Pão
ORS Feroz	Precoce	OR Sementes/2020	Irrigado/Sequeiro	Melhorador

Sequeiro: para altitudes acima de 800 m; Irrigado: para altitudes acima de 400 m.
Fonte: Rocca da Cunha; Caierão (2022).

2.3 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 2×6, com cinco repetições e uma unidade experimental de uma planta de trigo por vaso. Os seis genótipos de trigo foram testados com dois regimes hídricos: Plantas irrigadas (WW) e plantas sob déficit hídrico (WD).

2.4 Condições de cultivo

Sementes de trigo foram germinadas em papel de filtro até que a radícula das plântulas atingisse um comprimento de 2 cm (cerca de três dias a 22-25 °C). As plântulas dos genótipos com aproximadamente o mesmo tamanho foram selecionadas e transferidas para vasos do tipo rizotron (tamanho: 42,5x29,5x3,5cm) preenchidos com 2,8 L de areia lavada e substrato comercial Tropstrato (Vida verde®, composição: Casca de Pinus, Vermiculita, PG Mix 14.16.18, Nitrato de Potássio, Superfosfato Simples e Turfa), indicado para floreiras e vasos, na proporção de 1:1. Os rizotrons foram inclinados 43° em direção ao plano horizontal com a placa transparente voltada para baixo para direcionar o crescimento da raiz em direção à placa transparente e melhorar a visualização da raiz. As plantas foram mantidas em casa de vegetação

com temperatura controlada de 26 ± 2 °C, umidade relativa variou entre 50% e 70%, densidade média máxima de fluxo de fótons fotossintéticos de $652 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, medida na copa da planta e fotoperíodo de 12h claro e 12h escuro. No primeiro dia do experimento, ambos os grupos de tratamento foram irrigados com solução nutritiva (Hoagland e Arnon, 1950) a 40% de força iônica. Aos 19º dias após o transplântio (DAT), o déficit hídrico moderado foi aplicado no estágio 1.3 do crescimento do trigo pela escala de Zadoks; Chang; Konzak, (1974), com o aparecimento das 3 primeiras folhas verdadeiras, submetendo as plantas a 80% da capacidade de campo, aumentando o déficit em 20% a cada 7 dias, dos 19 aos 40 DAT, até atingir um grau de saturação do solo de 30%, e mantida nesse ponto até 51 DAT, com as plantas no início do florescimento (estádio 6.0 de Zadoks), o que permitiu a avaliação morfológica, efeitos anatômicos e fisiológicos do déficit hídrico.

Entre o 13º ao 51º DAT, a umidade do composto foi monitorada usando sensores resistivos de umidade com um módulo comparador de tensão LM393 e microcontrolador Arduino Mega 2560 que acionava automaticamente as bombas de irrigação assim que a umidade do composto atingisse um valor de resistência predeterminado específico para cada regime de água. As sondas do sensor de umidade foram posicionadas e duas estacas gotejadoras na parte inferior e superior do rizotron, respectivamente.

2.5 Análises de crescimento da planta

Aos 51 DAT, a altura das plantas foi mensurada, entre a superfície do substrato e o ponto mais alto da planta, com auxílio de uma fita métrica. Posteriormente os perfilhos da planta foram contados. O sistema radicular foi lavado em água para remoção do composto antes da amostragem. As folhas foram digitalizadas em um Scanner A3 (1200S, Mustek, China) para que a área foliar de todas as folhas fosse determinada por meio de análise de imagem com o software ImageJ. Raízes, caules e folhas foram secos a 60 °C até atingirem peso constante e em seguida a massa seca foi determinada em balança analítica (AY220, Shimadzu, São Paulo, Brasil). Posteriormente, com esses dados foram obtidos a área foliar específica ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$), razão de área foliar ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$), razão de massa foliar (g g^{-1}), razão raiz/parte aérea (g g^{-1}).

2.6 Potencial hídrico da folha (Ψ_w)

O potencial hídrico foliar foi determinado por meio de uma bomba de pressão portátil Scholander (modelo 1.000; PSM Instrument Company, Corvallis, Oregon, EUA), com gás N_2 aplicando pressão necessária para levar seiva ao corte feito na nervura central onde o potencial hídrico foi registrado. As avaliações foram realizadas aos 49 DAT, utilizando a terceira folha

bandeira (lígula presente) do primeiro e segundo perfilho a partir do topo do caule, totalmente expandidas, entre 4h e 5h30, quando o potencial hídrico foliar era mínimo, e entre 11h. e 12h30, ou seja, com potencial hídrico máximo, conforme previamente determinado.

2.7 Análise de trocas gasosas

Aos 48 DAT, as trocas gasosas foram avaliadas com um analisador de gases à radiação infravermelha (IRGA), modelo LI-6400XT (Li-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska, EUA), equipado com uma câmara de 6 cm² e fonte de luz LED vermelha/azul (LI6400-02B, Li-Cor, Lincoln, Nebraska, EUA). As leituras foram realizadas entre as 08:00 e 11:00 horas, na segunda folha bandeira totalmente expandida. A densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD) foi padronizada em 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ na câmara do equipamento. Além disso, a função mixer do equipamento foi utilizada para fornecer 400 ppm de CO₂ durante as análises. Durante as medições, a temperatura da folha foi mantida em 28,5 °C. Foram avaliadas as taxas de assimilação fotossintética líquida (*A*), condutância estomática ao vapor de água (*g_{sw}*) e transpiração (*E*) e carbono interno (*C_i*). Calculou-se a relação carbono interno e externo (*C_i/C_a*), eficiência do uso da água na assimilação fotossintética do CO₂ – WUE (*A/E*) e eficiência de carboxilação (*A/C_i*).

2.8 Determinação de prolina

Aos 51 DAT, o conteúdo de prolina foi determinado de acordo com a metodologia descrita por Bates et al. (1973). Para o processo de extração da prolina das amostras, foram coletadas folhas totalmente expandidas, sendo as mesmas utilizadas para avaliar o potencial hídrico foliar, ou seja, a terceira folha bandeira do primeiro e segundo perfilho a partir do topo do caule. As folhas foram secas à 60 °C, moídas em moinho e em seguida, pesado 100 mg e transferidas para tubos de ensaios e adicionado ácido sulfosalicílico à 3%. A quantificação da prolina foi com a reação de ninhidrina (ninidrina, ácido acético glacial e ácido fosfórico) e incubado a 100 °C por 60 minutos, em banho-maria. A leitura da absorbância foi em espectrofotômetro em 520 nm e os valores expressos em $\mu\text{mol g}^{-1}$ de massa seca.

2.9 Análises anatômicas foliares

No final do período experimental, aos 51 DAT, foi coletada a segunda folha, totalmente expandida para o estudo da anatomia foliar. As amostras foliares foram fixadas em FAA a 70% (Johansen, 1940) submetidas à desidratação por meio de soluções com concentração crescente de etanol (70, 80, 90 e 100%), com intervalos de 2 horas em temperatura ambiente. Posteriormente foram infiltradas por 24 horas em historesina (Leica Microsystems, Heidelberg, Alemanha), submetidas a secções transversais (espessura de 7 μm), com auxílio de micrótomo rotativo semiautomático, coradas com azul de toluidina à 0,05% (w/v) (Feder e O'Brien, 1968) e montadas em lâminas permanentes com Entellan (Merck, Darmstadt, Germany).

Em secção transversal das folhas, na região da nervura central, foram determinadas as áreas ocupadas pela nervura central, colênquima e feixes vasculares e o diâmetro dos vasos do metaxilema. As áreas do colênquima, feixes vasculares e área do floema foram estimados com base no cálculo: Colênquima (CO) = (área do colênquima/ área total da nervura central) x 100; Feixe vascular (FV) = (área dos feixes vasculares/ área total da nervura central) x 100; Área do Floema (AF) = (área do floema/ área total da nervura central) x 100. Na região internerval da folha foram quantificados a espessura da epiderme adaxial e abaxial, espessura do mesofilo, e a distância entre os feixes vasculares. Além disso, foi avaliada a porcentagem de área ocupada pela câmara subestomática. As porcentagens da área da câmara subestomática foram calculadas das seguintes formas: (área da câmara subestomática / área total do parênquima clorofiliano) x 100.

Em adição ao estudo com secções transversais, secções paradérmica nas faces adaxial e abaxial, à mão livre, foram obtidos utilizando-se lâmina de aço, clarificados com hipoclorito de sódio (50%), lavados em água destilada, corados com safranina à 1% e montados em lâminas semipermanentes com 50% de glicerol (Johansen, 1940). As lâminas foram fotografadas com câmera acoplada ao microscópio (Eclipse E100-LED; Nikon, Tóquio, Japão). Dados anatômicos quantitativos foram obtidos com auxílio do software ImageJ.

Nas secções paradérmicas, foram determinadas a densidade de células epidérmicas e de estômatos e calculado o índice estomático. O índice estomático (IE) foi calculado da seguinte forma: (IE) = [número de estômatos/ (número de estômatos + número de células epidérmicas regulares)] x 100.

2.10 Análises estatísticas

Os dados foram testados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk. As médias foram submetidas à análise de variância (ANOVA), seguido do teste Scott-Knott. Todas as análises foram realizadas com auxílio do software Sisvar 5.0 (Ferreira, 2011). Foi realizada uma análise de agrupamento (Cluster), em que, a partir da distância euclidiana entre os genótipos obteve a formação dos grupos, pelo método Unweighted Paired Group Average (UPGMA), posteriormente foi realizado uma Análise de Componentes Principais (PCA), para avaliar a influência dos grupos formados na PCA, foi aplicado uma Análise de Variância Multivariada Permutacional (PERMANOVA). Essas análises foram feitas no software R (Core Team, 2020).

3 RESULTADOS

3.1 Crescimento de plantas

A altura das plantas (PH) apresentou uma redução na condição de WD. Os genótipos BRS 404 e BRS 264 apresentaram a maior altura das plantas entre os genótipos analisados (Tabela 2). Em relação ao perfilhamento das plantas, apresentou redução na condição de WD. Portanto não houve interações significativas entre os genótipos. (Tabela 2).

Tabela 2. Altura e perfilhamento dos genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD).

Water condition	PH (cm)	T
WW	69.60 ± 10.41 a	11.86 ± 10.41 a
WD	64.76 ± 7.78 b	8.73 ± 7.78 b
Genotypes		
BRS 404	74.30 ± 11.71 a	10.50 ± 11.71 a
BRS 264	74.90 ± 6.80 a	8.90 ± 6.80 a
Brilhante	67.30 ± 6.98 b	10.70 ± 6.98 a
Tbio Aton	57.30 ± 9.32 c	11.20 ± 9.32 a
Tbio Duque	65.40 ± 7.23 b	10.40 ± 7.23 a
ORS Feroz	63.90 ± 3.56 b	10.10 ± 3.56 a

As médias seguidas da mesma letra minúsculas não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Abreviaturas: PH, altura das plantas; T, perfilhos. Médias ± DP.

Em condições de WW, observou-se um aumento na área foliar nos genótipos BRS 404 e MGS Brilhante, enquanto em condições de WD todos os genótipos analisados responderam de forma similar em relação à área foliar. Ao considerar os genótipos individualmente entre as condições hídricas, a maioria apresentou um aumento na área foliar em condições de WW,

exceto o genótipo ORS Feroz, para o qual não foi observado efeito da condição de WD na alteração desta medida (Tabela 3).

Tabela 3. Área foliar dos genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD).

Genotypes	LA (cm ² plant ⁻¹)	
	WW	WD
BRS 404	1627.64 ± 513.46 Aa	465.04 ± 165.08 Ab
BRS 264	800.17 ± 246.24 Ba	432.72 ± 111.90 Ab
Brilhante	1589.93 ± 283.59 Aa	610.80 ± 160.12 Ab
Tbio Aton	1175.22 ± 388.75 Ba	514.67 ± 134.59 Ab
Tbio Duque	1023.03 ± 380.10 Ba	412.18 ± 185.63 Ab
ORS Feroz	890.45 ± 229.33 Ba	610.93 ± 205.72 Aa

As médias seguidas da mesma letra maiúsculas (entre genótipos) e mesma letra minúsculas (entre condições), não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Abreviatura: LA, área foliar total. Médias ± DP.

Em condição de WW, foi observado aumento na massa seca foliar para os genótipos BRS 404 e MGS Brilhante, já em WD, todos os genótipos mostraram a mesma resposta. Entre as condições hídricas, os genótipos responderam de maneira semelhante, com médias de massa seca foliar mais altas em condição de WW (Tabela 4). Quanto à massa seca da parte aérea, houve um aumento significativo para os genótipos BRS 404 e MGS Brilhante em condição de WW. O genótipo MGS Brilhante apresentou um aumento significativo na massa seca da parte aérea sob condição de WD. Observando os genótipos individualmente, todos responderam de forma semelhante, com o estresse por WD diminuindo a massa seca da parte aérea (Tabela 4).

Sob WW, o genótipo BRS 264 foi o único a apresentar um aumento significativo na massa seca da raiz, enquanto que as condições de WD não alteraram as médias para essa medida. Ao analisar os genótipos individualmente na condição de WD, BRS 264, MGS Brilhante e Tbio Aton demonstraram uma diminuição na massa seca da raiz em resposta ao estresse (Tabela 4).

A massa seca total em condição de WW, o genótipo BRS 264, apresentaram um aumento significativo, já em condição de WD, todos os genótipos tiveram o mesmo tipo de resposta frente ao estresse. Analisando individualmente os genótipos entre as condições hídricas, apresentaram o mesmo tipo de resposta, diminuindo a sua massa seca total na WD (Tabela 4).

Tabela 4. Características do crescimento dos genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD).

Genotypes	LDM (g plant ⁻¹)		SDM (g plant ⁻¹)		RDM (g plant ⁻¹)		TDM (g plant ⁻¹)	
	WW	WD	WW	WD	WW	WD	WW	WD
BRS 404	6.49 ± 0.92 Aa	2.11 ± 1.46 Ab	30.95 ± 5.02 Aa	12.85 ± 3.89 Bb	47.42 ± 13.72 Ba	22.79 ± 9.78 Aa	78.38 ± 12.59 Ba	35.64 ± 15.10 Ab
BRS 264	5.01 ± 1.04 Ba	1.83 ± 1.02 Ab	25.14 ± 4.95 Ba	10.79 ± 1.36 Bb	96.62 ± 51.25 Aa	22.26 ± 21.67 Ab	121.77 ± 59.56 Aa	33.05 ± 24.40 Ab
Brilhante	7.74 ± 1.29 Aa	3.66 ± 0.79 Ab	32.09 ± 6.30 Aa	17.74 ± 2.56 Ab	60.93 ± 33.08 Ba	25.01 ± 13.45 Ab	93.02 ± 45.03 Ba	42.76 ± 16.65 Ab
Tbio Aton	5.62 ± 1.16 Ba	2.75 ± 0.71 Ab	22.25 ± 2.03 Ba	10.16 ± 2.23 Bb	56.57 ± 32.86 Ba	21.37 ± 8.51 Ab	78.82 ± 31.62 Ba	31.53 ± 10.60 Ab
Tbio Duque	5.30 ± 1.61 Ba	2.36 ± 1.04 Ab	19.64 ± 7.26 Ba	11.46 ± 3.04 Bb	48.95 ± 39.04 Ba	15.98 ± 8.16 Aa	68.59 ± 44.76 Ba	27.44 ± 11.98 Ab
ORS Feroz	4.93 ± 0.57 Ba	1.89 ± 1.10 Ab	22.47 ± 2.56 Ba	11.68 ± 1.86 Bb	49.78 ± 31.09 Ba	18.61 ± 4.35 Aa	72.25 ± 34.55 Ba	30.29 ± 2.38 Ab

As médias seguidas da mesma letra maiúsculas (entre genótipos) e mesma letra minúsculas (entre condições), não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Abreviaturas: LDM, massa seca foliar; SDM, massa seca da parte aérea; RDM, massa seca da raiz; TDM, massa seca total. Médias ± DP.

Em relação à razão raiz/parte aérea, o genótipo BRS 264 apresentou a maior média sob a condição de WW enquanto o tratamento WD não provocou efeitos significativos nas plantas (Tabela 5). Em relação a razão de área foliar na condição de WW, somente o genótipo BRS 264 apresentou a menor média. Já no tratamento WD não foi observado alteração nessa razão. Analisando os genótipos individualmente entre as condições o tratamento WD não provocou efeitos significativos nas plantas (Tabela 5). Os tratamentos WW e WD não alteraram os valores da razão de massa foliar (Tabela 5).

A área foliar específica apresentou diferenças significativas. Na condição de WW, quase todos os genótipos apresentaram a mesma resposta na área foliar específica, exceto os genótipos BRS 264 e ORS Feroz que houve uma diminuição significativa em sua área foliar específica. Em condição de WD, somente os genótipos Tbio Aton e ORS FERROZ resultou medias maiores na área foliar específica (Tabela 5). Analisando individualmente os genótipos entre as condições hídricas, os genótipos BRS 404, MGS Brilhante e Tbio Duque reduziram a área foliar específica na WD, no entanto, os genótipos BRS 264, Tbio Aton e ORS Feroz não reduziu sua área foliar específica na WD (Tabela 5).

Tabela 5. Índices fisiológicos de genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD).

Genotypes	RSR (g g ⁻¹)		LAR (cm ² g ⁻¹)		LMR (g g ⁻¹)		SLA (g g ⁻¹)	
	WW	WD	WW	WD	WW	WD	WW	WD
BRS 404	1.54 ± 0.45 Ba	1.74 ± 0.44 Aa	21.36 ± 7.35 Aa	13.70 ± 4.15 Aa	0.40 ± 0.06 Aa	0.37 ± 0.06 Aa	52.32 ± 11.04 Aa	36.24 ± 5.67 Bb
BRS 264	3.91 ± 2.36 Aa	1.92 ± 1.63 Ab	7.81 ± 4.86 Bb	17.54 ± 9.72 Aa	0.23 ± 0.11 Aa	0.40 ± 0.15 Aa	32.10 ± 9.13 Ba	41.04 ± 13.78 Ba
Brilhante	1.81 ± 0.61 Ba	1.40 ± 0.66 Aa	19.19 ± 7.38 Aa	15.08 ± 5.33 Aa	0.36 ± 0.07 Aa	0.44 ± 0.12 Aa	50.65 ± 10.95 Aa	35.34 ± 10.76 Bb
Tbio Aton	2.50 ± 1.36 Ba	2.10 ± 0.72 Aa	15.57 ± 3.36 Aa	16.78 ± 3.61 Aa	0.31 ± 0.12 Aa	0.33 ± 0.07 Aa	52.20 ± 14.20 Aa	51.42 ± 14.24 Aa
Tbio Duque	2.17 ± 1.13 Ba	1.35 ± 0.38 Aa	18.39 ± 6.70 Aa	15.51 ± 6.71 Aa	0.34 ± 0.12 Aa	0.43 ± 0.06 Aa	52.41 ± 5.34 Aa	35.53 ± 12.95 Bb
ORS Feroz	2.15 ± 1.23 Ba	1.58 ± 0.19 Aa	13.91 ± 5.17 Aa	20.14 ± 5.83 Aa	0.36 ± 0.14 Aa	0.38 ± 0.03 Aa	39.20 ± 6.39 Ba	51.85 ± 14.79 Aa

As médias seguidas da mesma letra maiúsculas (entre genótipos) e mesma letra minúsculas (entre condições), não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Abreviaturas: RSR, razão raiz/ parte aérea; LAR, razão de área foliar; LMR, razão de massa foliar; SLA, área foliar específica. Médias ± DP.

3.2 Características fisiológicas

As variáveis analisadas das trocas gasosas foliares não apresentaram interações entre os fatores. Entretanto, de forma isolada, apresentou diferença entre as condições hídricas (Tabela 6, 7). As variáveis A , E , G_{sw} , Ci , e Ci/Ca resultaram em uma diminuição na WD, exceto a WUE que obteve resultado diferente onde houve um aumento significativo na WD. Na variável A/Ci o estresse da WD, não alterou seus resultados (Tabela 6, 7).

Tabela 6. Trocas gasosas foliares de genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD).

Water condition	A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	E ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	G_{sw} ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	WUE ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$)
WW	24.12 \pm 4.29 a	7.39 \pm 0.98 a	0.61 \pm 0.08 a	3.25 \pm 0.39 b
WD	21.88 \pm 2.58 b	5.60 \pm 1.11 b	0.39 \pm 0.12 b	4.02 \pm 0.78 a
Genotypes				
BRS 404	22.38 \pm 2.56 a	6.46 \pm 1.13 a	0.51 \pm 0.09 a	3.69 \pm 0.70 a
BRS 264	24.74 \pm 5.36 a	6.93 \pm 1.24 a	0.56 \pm 0.13 a	3.58 \pm 0.44 a
Brilhante	24.73 \pm 3.60 a	6.79 \pm 1.13 a	0.52 \pm 0.09 a	3.81 \pm 0.88 a
Tbio Aton	20.96 \pm 3.54 a	6.25 \pm 1.20 a	0.46 \pm 0.10 a	3.47 \pm 0.53 a
Tbio Duque	21.59 \pm 3.38 a	6.06 \pm 1.17 a	0.46 \pm 0.12 a	3.63 \pm 0.56 a
ORS Feroz	23.58 \pm 2.16 a	6.48 \pm 0.49 a	0.48 \pm 0.05 a	3.65 \pm 0.38 a

As médias seguidas da mesma letra maiúsculas (entre genótipos) e mesma letra minúsculas (entre condições), não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Abreviaturas: A, taxa fotossintética líquida; E, transpiração; g_{sw} , condutância estomática; WUE, eficiência no uso da água. Médias \pm DP.

Tabela 7. Trocas gasosas foliares de genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD).

Water condition	Ci/Ca	Ci ($\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	A/Ci ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$)
WW	0.78 \pm 0.03 a	299.09 \pm 12.31 a	0.08 \pm 0.02 a
WD	0.70 \pm 0.07 b	268.43 \pm 26.95 b	0.08 \pm 0.02 a
Genotypes			
BRS 404	0.74 \pm 0.07 a	282.78 \pm 27.48 a	0.07 \pm 0.01 a
BRS 264	0.76 \pm 0.04 a	287.66 \pm 17.09 a	0.08 \pm 0.02 a
Brilhante	0.73 \pm 0.07 a	277.37 \pm 28.40 a	0.09 \pm 0.02 a
Tbio Aton	0.75 \pm 0.04 a	287.18 \pm 15.09 a	0.07 \pm 0.01 a
Tbio Duque	0.74 \pm 0.04 a	285.50 \pm 17.20 a	0.07 \pm 0.01 a
ORS Feroz	0.74 \pm 0.03 a	282.06 \pm 12.51 a	0.08 \pm 0.01 a

As médias seguidas da mesma letra maiúsculas (entre genótipos) e mesma letra minúsculas (entre condições), não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Abreviaturas: Ci/Ca , proporção de carbono interno e externo; WUE, eficiência no uso da água; A/Ci , eficiência instantânea de carboxilação. Médias \pm DP.

O potencial hídrico da folha registrado na madrugada e ao meio dia diminuiu sob WD, no entanto, não houve diferenças significativas entre os genótipos (Tabela 8).

Tabela 8. Potencial hídrico foliar (Ψ_w) registrado na madrugada e ao meio dia de genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD).

Water condition	LWPam (MPa)	LWPPm (MPa)
WW	-0.53 ± 0.15 a	-1.75 ± 0.24 a
WD	-0.64 ± 0.15 b	-1.90 ± 0.26 b
Genotypes		
BRS 404	-0.56 ± 0.13 a	-1.86 ± 0.32 a
BRS 264	-0.54 ± 0.14 a	-1.84 ± 0.38 a
Brilhante	-0.62 ± 0.15 a	-1.85 ± 0.24 a
Tbio Aton	-0.61 ± 0.22 a	-1.73 ± 0.09 a
Tbio Duque	-0.54 ± 0.10 a	-1.75 ± 0.21 a
ORS Feroz	-0.64 ± 0.14 a	-1.93 ± 0.26 a

Médias seguidas de letras iguais nas condições hídricas e genótipos não diferem pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Abreviaturas: LWPam, potencial hídrico foliar antes do amanhecer; LWPPm, potencial hídrico foliar ao meio-dia. Médias ± DP.

O conteúdo de prolina foliar na condição de WW, os genótipos não apresentaram diferenças significativa nos seus resultados, no entanto, a condição de WD apresentou diferenças significativas, o genótipo BRS 264, Tbio Duque e ORS Feroz resultaram em maiores médias na WD. Analisando individualmente os genótipos entre as condições hídricas, os genótipos BRS 404, MGS Brilhante e Tbio Aton obtiveram os mesmos resultados, reduzindo o conteúdo de prolina na WD (Tabela 9).

Tabela 9. Conteúdo de prolina em massa seca foliar de genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD).

Genotypes	P ($\mu\text{mol g}^{-1}$ DW)			
	WW		WD	
BRS 404	18.06 ± 6.57	Aa	8.73 ± 1.70	Bb
BRS 264	16.77 ± 10.67	Aa	12.55 ± 3.17	Aa
Brilhante	21.73 ± 4.08	Aa	8.07 ± 3.01	Bb
Tbio Aton	16.96 ± 7.38	Aa	6.17 ± 1.85	Bb
Tbio Duque	13.38 ± 5.95	Aa	16.40 ± 10.75	Aa
ORS Feroz	15.88 ± 6.76	Aa	14.37 ± 0.50	Aa

As médias seguidas da mesma letra maiúsculas (entre genótipos) e mesma letra minúsculas (entre condições), não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Abreviaturas: P; Conteúdo de prolina foliar. Médias ± DP.

3.3 Características anatômicas da folha

A espessura da epiderme adaxial, na condição de WW, os genótipos BRS 404, MGS Brilhante e ORS Feroz, houve um aumento significativo em sua espessura da epiderme adaxial. Em condições de WD, os genótipos apresentaram os mesmos resultados. Analisando individualmente os genótipos entre as condições hídricas, os genótipos Tbio Aton e Tbio duque aumentaram sua espessura da epiderme adaxial na WD, no entanto, os genótipos BRS 404, BRS 264 e MGS Brilhante na WD, não alteraram seus resultados (Tabela 10). Em relação a espessura da epiderme abaxial, não apresentou diferenças significativas na maioria dos genótipos e condições hídricas, exceto o genótipo Tbio Aton, houve uma redução significativa na sua espessura da epiderme abaxial na WD (Tabela 10).

Na espessura do mesofilo, não houve diferenças significativa entre os genótipos nas condições hídricas (Tabela 10, Figura 1). Analisando individualmente os genótipos, a espessura do mesofilo reduziu para a maioria dos genótipos na WD, exceto o genótipo BRS 264 que o estresse de WD não alterou sua espessura do mesofilo (Tabela 10, Figura 1b e h). Na variável distância entre os feixes vasculares no mesofilo, na condição de WW, somente o genótipo MGS Brilhante resultou em um aumento significativo. Na condição de WD, os genótipos apresentaram os mesmos resultados na distância dos feixes vasculares no mesofilo. Analisando individualmente os genótipos nas condições hídricas, somente os genótipos MGS Brilhante e Tbio Aton resultaram em uma diminuição na distância dos feixes vasculares na WD (Tabela 10).

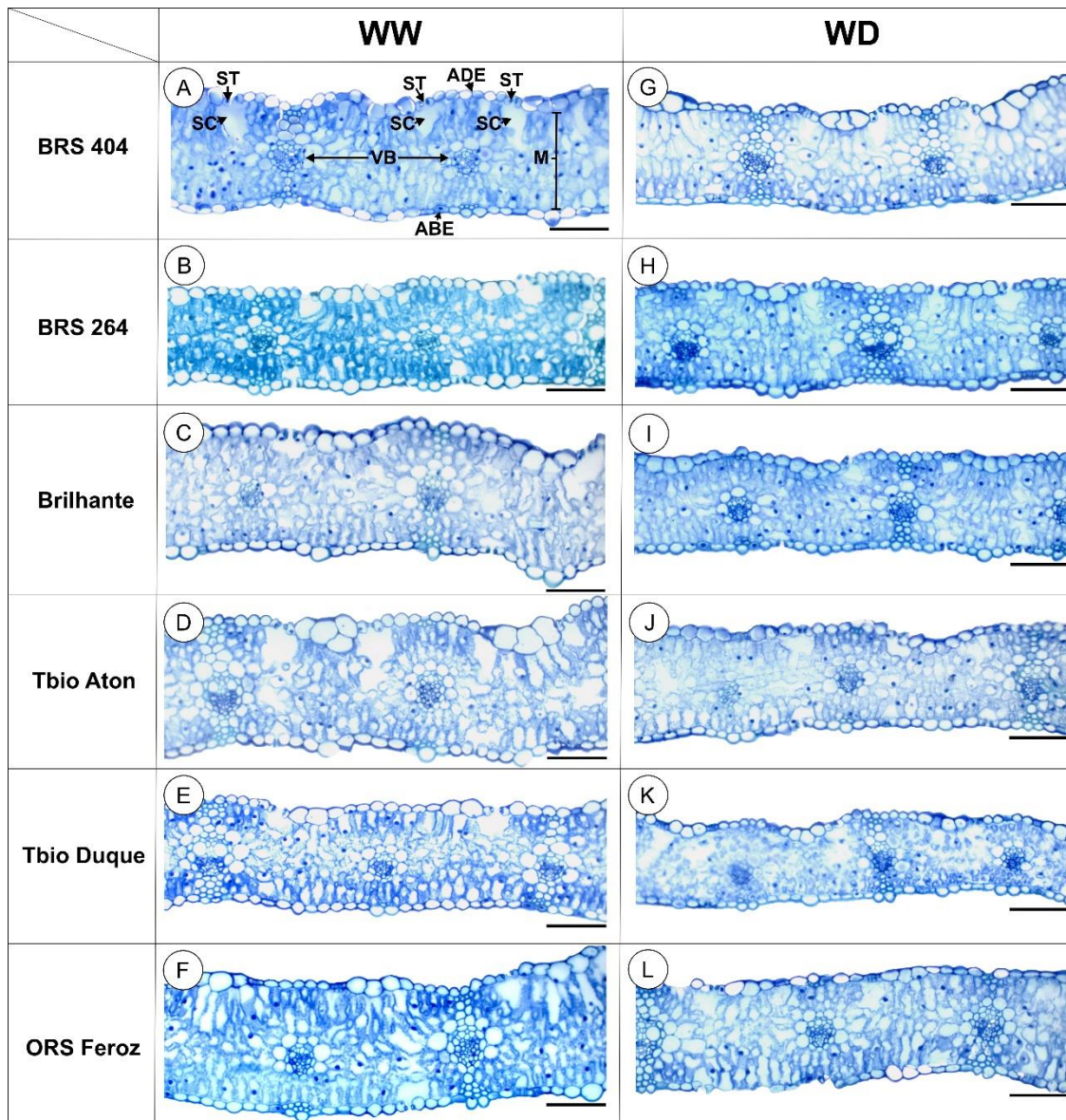
A área da cavidade subestomática não apresentou diferenças significativas entre os genótipos nas condições hídricas. No entanto, analisando os genótipos individualmente entre as condições hídricas, resultou uma diminuição da área da cavidade subestomática para os genótipos MGS Brilhante e Tbio Aton na WD (Tabela 10).

Tabela 10. Características anatômicas da secção transversal da lâmina foliar de genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD).

Genotypes	ETAD (μm)		ETAB (μm)		MT (μm)		DBVB (μm)		SCA (%)	
	WW	WD	WW	WD	WW	WD	WW	WD	WW	WD
BRS 404	22.21 \pm 2.86 Aa	21.18 \pm 6.67 Aa	14.10 \pm 2.01 Aa	14.77 \pm 2.16 Aa	170.54 \pm 7.80 Aa	140.31 \pm 14.08 Ab	193.71 \pm 17.67 Ba	171.57 \pm 37.20 Aa	3.00 \pm 1.67 Aa	2.99 \pm 1.44 Aa
BRS 264	18.72 \pm 4.80 Ba	18.70 \pm 2.13 Aa	15.70 \pm 1.62 Aa	15.72 \pm 2.50 Aa	144.48 \pm 11.95 Aa	137.79 \pm 7.26 Aa	214.70 \pm 36.07 Ba	203.14 \pm 27.32 Aa	2.50 \pm 0.96 Aa	2.70 \pm 0.35 Aa
MGS Brilhante	24.36 \pm 3.71 Aa	20.46 \pm 3.04 Aa	18.83 \pm 3.07 Aa	16.41 \pm 1.48 Aa	174.49 \pm 21.82 Aa	145.68 \pm 20.60 Ab	275.56 \pm 43.06 Aa	190.34 \pm 34.56 Ab	3.69 \pm 1.24 Aa	1.88 \pm 0.35 Ab
TBIO Aton	19.22 \pm 4.74 Bb	18.79 \pm 1.41 Aa	15.45 \pm 4.57 Aa	11.48 \pm 1.78 Bb	160.54 \pm 27.66 Aa	126.67 \pm 15.39 Ab	222.28 \pm 39.88 Ba	157.55 \pm 15.07 Ab	4.25 \pm 2.53 Aa	2.57 \pm 0.99 Ab
TBIO Duque	19.97 \pm 5.08 Bb	18.87 \pm 3.06 Aa	15.93 \pm 3.94 Aa	15.36 \pm 1.64 Aa	156.52 \pm 21.14 Aa	119.68 \pm 9.21 Ab	195.62 \pm 28.20 Ba	166.89 \pm 24.91 Aa	3.09 \pm 0.65 Aa	3.01 \pm 1.66 Aa
ORS Feroz	25.10 \pm 1.96 Aa	19.56 \pm 1.76 Ab	16.91 \pm 1.11 Aa	14.93 \pm 2.14 Aa	161.99 \pm 16.08 Aa	129.33 \pm 24.54 Ab	205.04 \pm 15.61 Ba	172.80 \pm 34.00 Aa	2.39 \pm 1.06 Aa	2.14 \pm 0.82 Ab

As médias seguidas da mesma letra maiúsculas (entre genótipos) e mesma letra minúsculas (entre condições), não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Abreviaturas: ETAD, espessura da epiderme adaxial; ETAB, espessura da epiderme abaxial; MT, espessura do mesofilo; DBVB, distância entre os feixes vasculares no mesofilo; SCA; Área da cavidade subestomática. Médias \pm DP.

Figura 1. Secções transversais representando a lâmina foliar de genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD).



Abreviaturas: SC, Cavidade subestomática; ST; estômatos; VB, feixe vascular; ADE, epiderme adaxial; ABE, epiderme abaxial; M, mesofilo. Barra 100 μm .

Na área total da nervura central, na condição de WW, o genótipo MGS Brilhante resultou em uma maior área total da nervura central. (Tabela 11, Figura 2c). Na condição de WD, os genótipos apresentaram os mesmos resultados em sua área total da nervura central. Analisando individualmente os genótipos entre as condições hídricas, a maioria dos genótipos apresentou uma redução na área total da nervura central na WD, exceto o genótipo BRS 264 em que o estresse da WD não alterou seu resultado (Tabela 11, Figura 2b, h).

A área do feixe vascular da nervura central, os genótipos apresentaram os mesmos resultados nas condições de WW e WD. Analisando individualmente os genótipos, a maioria

aumentou o feixe vascular em WW, exceto os genótipos BRS 264 e ORS Feroz que manteve os mesmos resultados em condições de WW e WD (Tabela 11). Em relação a área do floema da nervura central, os genótipos apresentaram os mesmos resultados nas condições de WW e WD. Em relação aos genótipos individualmente entre as condições, os genótipos BRS 404, Tbio Aton e Tbio Duque apresentaram uma redução na área do floema na condição de WW (Tabela 11).

Para a variável área do colênquima da nervura central, na condição de WW, o genótipo MGS Brilhante resultou em uma área maior do colênquima. Na condição de WD, não houve diferença significativa entre os genótipos. Analisando os genótipos individualmente, os genótipos Tbio Aton e MGS Brilhante, reduziram sua área de colênquima na condição WD (Tabela 11).

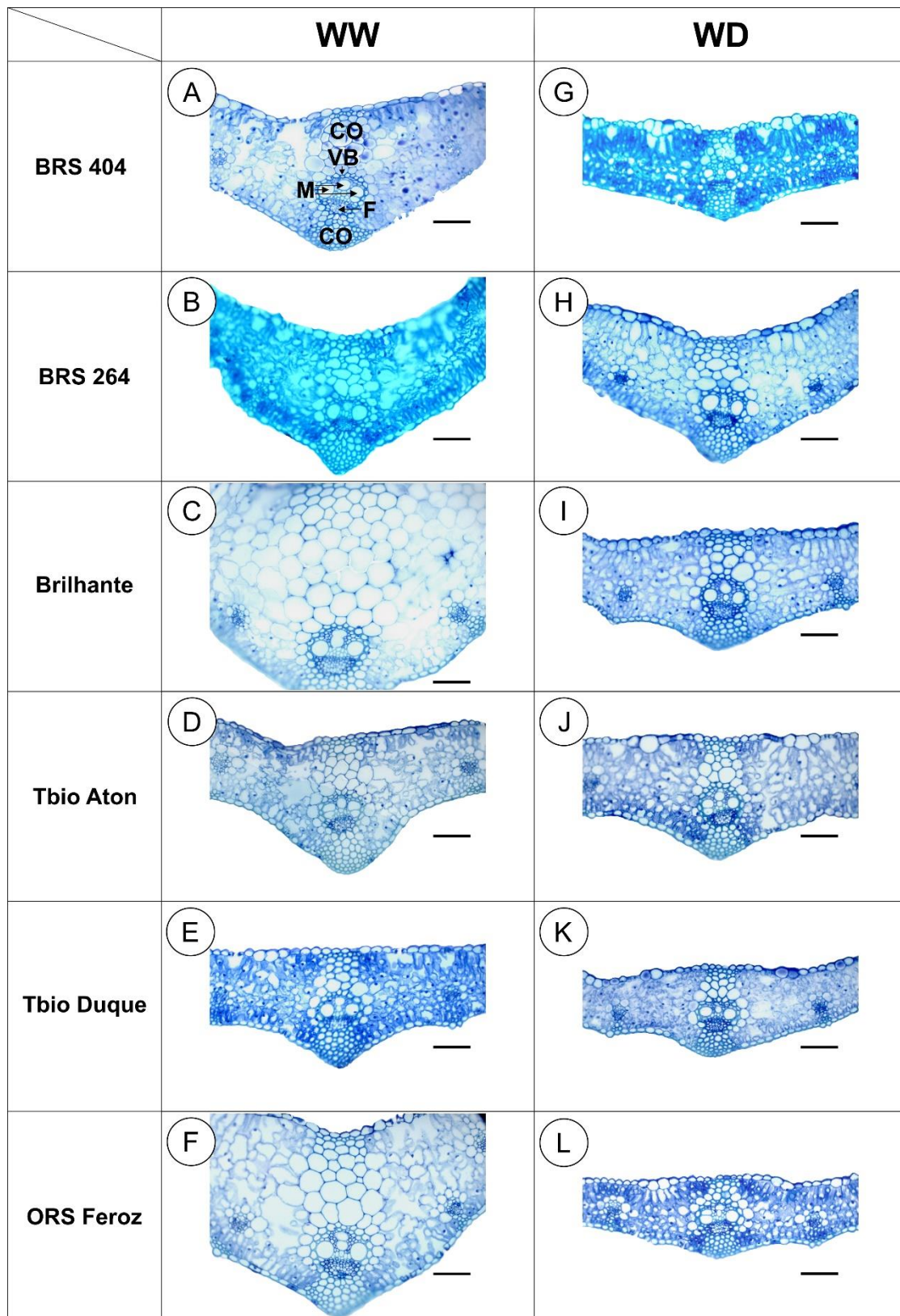
Para o diâmetro do metaxilema da nervura central, na condição de WW, o genótipo ORS Feroz foi o único que resultou em um diâmetro maior do metaxilema. Na condição de WD, os genótipos BRS 264, BRS 404, MGS Brilhante e ORS Feroz obtiveram as maiores médias no diâmetro do metaxilema. No entanto, analisando os genótipos individualmente entre as condições hídricas, os genótipos MGS Brilhante, Tbio Duque e ORS Feroz resultaram em um diâmetro menor do metaxilema na condição de WD (Tabela 11).

Tabela 11. Características anatômicas da secção transversal da nervura central foliar de genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD).

Genotypes	TAM (μm^2)		VBA (%)		PA (%)		CA (%)		MD (μm)	
	WW	WD	WW	WD	WW	WD	WW	WD	WW	WD
BRS 404	203516 \pm 53140 Ba	69350 \pm 20890 Ab	6.9 \pm 1.33 Ab	13.78 \pm 2.65 Aa	1.54 \pm 0.54 Ab	2.70 \pm 0.44 Aa	20.54 \pm 4.44 Ca	21.00 \pm 4.64 Aa	32.36 \pm 3.12 Ba	30.70 \pm 5.27 Aa
BRS 264	152293 \pm 45966 Ba	118690 \pm 35545 Aa	8.64 \pm 3.07 Aa	9.51 \pm 0.88 Aa	1.74 \pm 0.78 Aa	2.00 \pm 0.46 Aa	19.53 \pm 4.25 Ca	20.85 \pm 3.95 Aa	32.98 \pm 3.26 Ba	31.40 \pm 4.20 Aa
MGS Brilhante	294633 \pm 53100 Aa	114569 \pm 35745 Ab	5.53 \pm 0.89 Ab	10.53 \pm 3.85 Aa	1.25 \pm 0.26 Aa	2.10 \pm 0.75 Aa	36.76 \pm 5.10 Aa	21.30 \pm 2.85 Ab	35.35 \pm 5.08 Ba	29.70 \pm 3.16 Ab
TBIO Aton	157494 \pm 92760 Ba	75071 \pm 26024 Ab	7.65 \pm 2.53 Ab	14.35 \pm 3.74 Aa	1.73 \pm 0.80 Ab	3.00 \pm 0.76 Aa	28.37 \pm 2.99 Ba	19.40 \pm 4.04 Ab	27.65 \pm 6.24 Ba	22.43 \pm 4.22 Ba
TBIO Duque	156914 \pm 47924 Ba	74235 \pm 8997 Ab	7.77 \pm 2.51 Ab	12.01 \pm 0.70 Aa	1.77 \pm 0.76 Ab	2.81 \pm 0.31 Aa	19.76 \pm 2.63 Ca	19.67 \pm 1.50 Aa	31.98 \pm 1.68 Ba	26.34 \pm 3.28 Bb
ORS Feroz	199017 \pm 90654 Ba	109054 \pm 37953 Ab	10.66 \pm 5.11 Aa	12.84 \pm 3.92 Aa	2.18 \pm 1.17 Aa	2.41 \pm 0.88 Aa	21.38 \pm 5.06 Ca	17.69 \pm 3.40 Aa	41.04 \pm 5.09 Aa	32.81 \pm 1.78 Ab

As médias seguidas da mesma letra maiúsculas (entre genótipos) e mesma letra minúsculas (entre condições), não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Abreviaturas: TAM, Área total da nervura central; VBA, Área do feixe vascular; PA, Área do Floema; CA, Área do colênquima; MD, Diâmetro do Metaxilema. Médias \pm DP.

Figura 2. Secções transversais representando a lâmina foliar de genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD).



Abreviaturas: CO, colênquima; VB, feixe vascular; M, metaxilema; F, floema. Barra 100 μ m.

Para as variáveis da secção paradérmica da folha, o índice estomático adaxial, os genótipos BRS 404, BRS 264 e MGS Brilhante, na condição de WW, seus resultados foram significativos mostrando as maiores médias para o índice estomático adaxial. Na condição de WD, os genótipos BRS 404 e Tbio Aton, seus resultados mostraram um aumento no índice estomático adaxial. Analisando individualmente os genótipos entre as condições hídricas, na condição de WW, resultou em uma diminuição no índice estomático em relação a WD, principalmente nos genótipos BRS 404 e Tbio Aton (Tabela 12). Para o índice estomático abaxial não houve diferença significativa entre os genótipos e as condições hídricas (Tabela 12). Na densidade estomática adaxial, na condição de WW, os genótipos 404 e MGS Brilhante, seus resultados foram significativos mostrando as maiores médias na densidade estomática adaxial. Em relação na condição de WD, os genótipos BRS 404 e Tbio Duque, aumentaram a densidade estomática adaxial em relação aos outros genótipos. Analisando os genótipos individualmente entre condições hídricas, na condição de WD, os genótipos BRS 404, Tbio Aton e Tbio Duque resultou em maiores medias na WD em relação a WW (Tabela 12).

A densidade estomática abaxial, os genótipos BRS 404, MGS Brilhante, Tbio Duque e Tbio aton, apresentaram o mesmo tipo de resposta na condição de WW e WD, onde houve um resultado significativo que levou um aumento na densidade estomática abaxial. Analisando os genótipos individualmente entre as condições hídricas, não houve diferenças significativas (Tabela 12).

Tabela 12. Características anatômicas das células da epiderme foliar de genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD).

Genotypes	SIAD (%)		SIAB (%)		SDAD (Estômatos mm ⁻²)		SDAB (Estômatos mm ⁻²)	
	WW	WD	WW	WD	WW	WD	WW	WD
BRS 404	19.72 ± 2.15 Ab	24.73 ± 4.59 Aa	19.53 ± 2.81 Aa	16.96 ± 5.51 Aa	61.74 ± 9.40 Ab	77.54 ± 15.95 Aa	61.74 ± 9.40 Aa	62.23 ± 15.95 Aa
BRS 264	20.19 ± 1.38 Aa	17.55 ± 3.37 Ba	18.07 ± 2.74 Aa	16.40 ± 2.25 Aa	49.89 ± 7.41 Ba	55.32 ± 8.63 Ba	39.52 ± 7.41 Ba	46.43 ± 8.63 Ba
MGS Brilhante	21.29 ± 1.65 Aa	19.75 ± 2.71 Ba	20.86 ± 2.86 Aa	19.47 ± 2.99 Aa	57.29 ± 9.79 Aa	60.26 ± 26.60 Ba	57.29 ± 9.79 Aa	59.76 ± 22.60 Aa
TBIO Aton	16.74 ± 1.66 Bb	21.96 ± 3.12 Aa	20.46 ± 1.98 Aa	19.09 ± 0.94 Aa	47.91 ± 17.96 Bb	69.15 ± 7.73 Ba	60.75 ± 17.96 Aa	63.22 ± 7.73 Aa
TBIO Duque	15.09 ± 1.63 Ba	17.59 ± 1.58 Ba	18.09 ± 1.40 Aa	17.07 ± 2.21 Aa	44.46 ± 6.15 Bb	71.12 ± 14.76 Aa	56.31 ± 6.15 Aa	62.23 ± 14.76 Aa
ORS Feroz	16.85 ± 3.98 Ba	18.55 ± 1.12 Ba	18.02 ± 1.69 Aa	16.90 ± 2.96 Aa	42.97 ± 6.39 Ba	55.81 ± 5.79 Ba	43.96 ± 6.39 Ba	49.39 ± 5.79 Ba

As médias seguidas da mesma letra maiúsculas (entre genótipos) e mesma letra minúsculas (entre condições), não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Abreviaturas: SIAD, Índice estomático adaxial; SIAB, Índice estomático abaxial; SDAD, Densidade estomática adaxial; SDAB, Densidade estomática abaxial. Médias ± DP.

A densidade de células epidérmicas adaxial, na condição de WW, os genótipos BRS 404, Tbio Aton e Tbio Duque apresentaram as maiores densidades de células epidérmicas adaxial. Em condição de WD, o genótipo Tbio Duque, seus resultados foram significativos mostrando sua maior média na densidade estomática adaxial. Analisando os genótipos individualmente entre as condições hídricas, os genótipos, BRS 264 e Tbio duque apresentaram maiores médias para a densidade de células epidérmicas na WD (Tabela 13). Em relação a densidade de células epidérmicas abaxial, os genótipos BRS 404, MGS brilhante, Tbio Aton e Tbio Duque apresentaram as maiores densidades de células epidérmicas abaxial na condição de WW. Em condição de WD, o genótipo BRS 404 e Tbio Duque, seus resultados foram significativos mostrando sua maior média na densidade estomática abaxial. Analisando os genótipos individualmente entre as condições hídricas, o estresse por condição de WD, resultou um aumento de densidade de células epidérmicas abaxial nos genótipos, BRS 404, BRS 264 e ORS Feroz que apresentaram maiores médias na WD (Tabela 13).

Tabela 13. Características anatômicas das células da epiderme foliar de genótipos trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD).

Genotypes	ECDAD (Cells mm ⁻²)		ECDAB (Cells mm ⁻²)	
	WW	WD	WW	WD
BRS 404	252.90 ± 44.82 Aa	235.61 ± 49.57 Ba	255.87 ± 32.42 Ab	311.68 ± 59.23 Aa
BRS 264	197.08 ± 19.00 Bb	260.31 ± 28.78 Ba	178.31 ± 12.15 Bb	235.61 ± 10.71 Ba
MGS Brilhante	211.90 ± 22.19 Ba	244.50 ± 31.19 Ba	220.30 ± 48.13 Aa	240.06 ± 40.82 Ba
Tbio Aton	242.53 ± 52.11 Aa	249.44 ± 43.03 Ba	234.62 ± 54.31 Aa	267.72 ± 28.83 Ba
Tbio Duque	251.91 ± 37.21 Ab	332.92 ± 27.63 Aa	254.88 ± 19.00 Aa	298.34 ± 29.96 Aa
ORS Feroz	203.50 ± 29.92 Ba	243.52 ± 47.59 Ba	199.06 ± 7.93 Bb	250.43 ± 59.62 Ba

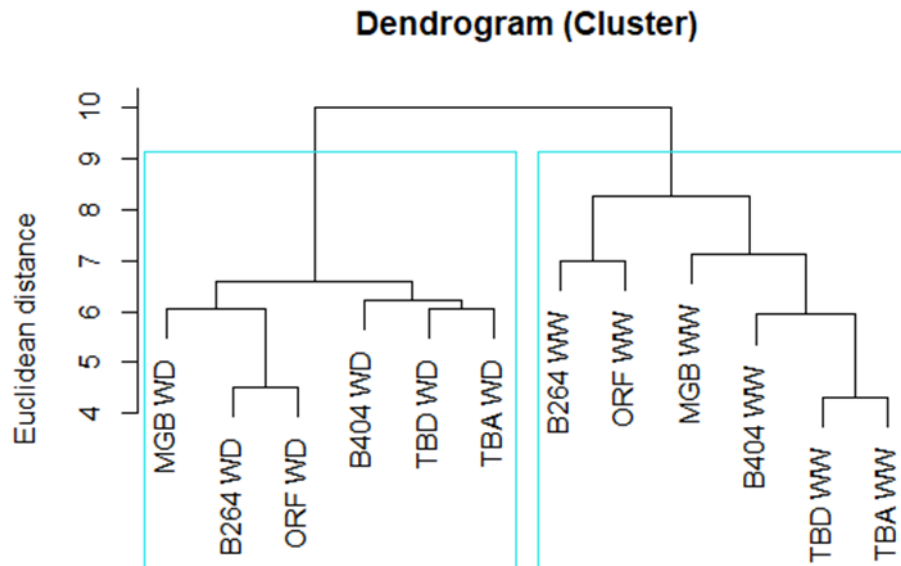
As médias seguidas da mesma letra maiúsculas (entre genótipos) e mesma letra minúsculas (entre condições), não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Abreviaturas: ECDAD, Densidade de células epidérmicas adaxial; ECDAB, densidade de células epidérmicas abaxial. Médias ± DP.

3.4 Análise de agrupamento pelo método UPGMA: (Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean)

O dendrograma resultante da análise de agrupamento, em relação a sua correlação cofenética, foi bastante significativo para as relações de proximidade entre as amostras originais, com um valor de 0.8071. No dendrograma (Cluster) ocorreu a formação de dois grupos que foram separados pelas condições hídricas: O grupo um (1) é formado por todos os

genótipos em estudo na condição normal de irrigação (WW). O grupo dois (2) é formado por todos os genótipos em estudo na condição de déficit hídrico (WD).

Figura 3. Dendrograma de agrupamento em distância euclidiana, método (UPGMA) de genótipos trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD).



Abreviaturas: MGB, MGS Brillhante; B264, BRS 264; ORF, ORS Feroz; B404, BRS 404; TBD, Tbio Duque; TBA, Tbio Aton.

A análise de porcentagem de similaridades (SIMPER) demonstrou o quanto cada variável contribuiu para a formação dos grupos no dendrograma. O grupo um (1) constituiu todos os genótipos em estudo nas condições de déficit hídrico (WD), as variáveis que representam a contribuição na formação do grupo foram: WUE, eficiência no uso da água; VBA, área do feixe vascular; PA, área do floema; LWPam, potencial hídrico foliar antes do amanhecer; SDAD, densidade estomática adaxial; LWPpm, potencial hídrico foliar ao meio-dia; ECDAB, densidade de células epidêmicas abaxial; ECDAD, densidade de células epidêmicas adaxial; LMR, razão de massa foliar; SIAD, índice estomático adaxial; SDAB, densidade estomática adaxial; A/Ci, eficiência instantânea de carboxilação e LAR, razão de área foliar (Figura 5).

O grupo dois (2) constituiu todos os genótipos em estudo nas condições normais de irrigação (WW), as variáveis que representam a contribuição na formação do grupo foram: Ci/Ca, proporção de carbono interno e externo; g_{sw} , condutância estomática; Ci, concentração intercelular de CO₂; TDM, massa seca total; LDM, massa seca foliar; E, transpiração; T,

perfilhos; SDM, massa seca da parte aérea; RDM, massa seca da raiz; MT, espessura do mesofilo; LA, área foliar total; TAM, Área total da nervura central; P, conteúdo de prolina foliar; DBVB, distância entre os feixes vasculares no mesofilo; SIAB, Índice estomático abaxial; MD, diâmetro do metaxilema; RSR; razão raiz/ parte aérea; A, taxa fotossintética líquida; SCA, área da cavidade subestomática; ETAD, espessura da epiderme adaxial; CA, área do colênquima; ETAB espessura da epiderme abaxial; PH, altura das plantas; SLA, área foliar específica (Figura 5).

Em relação a análise PERMANOVA (Permutational Multivariate Analysis of Variance), evidenciou que houve diferença estatística significativa entre os grupos um (1) e (2), $P= 0,006$.

3.5 Análise de componentes principais (PCA)

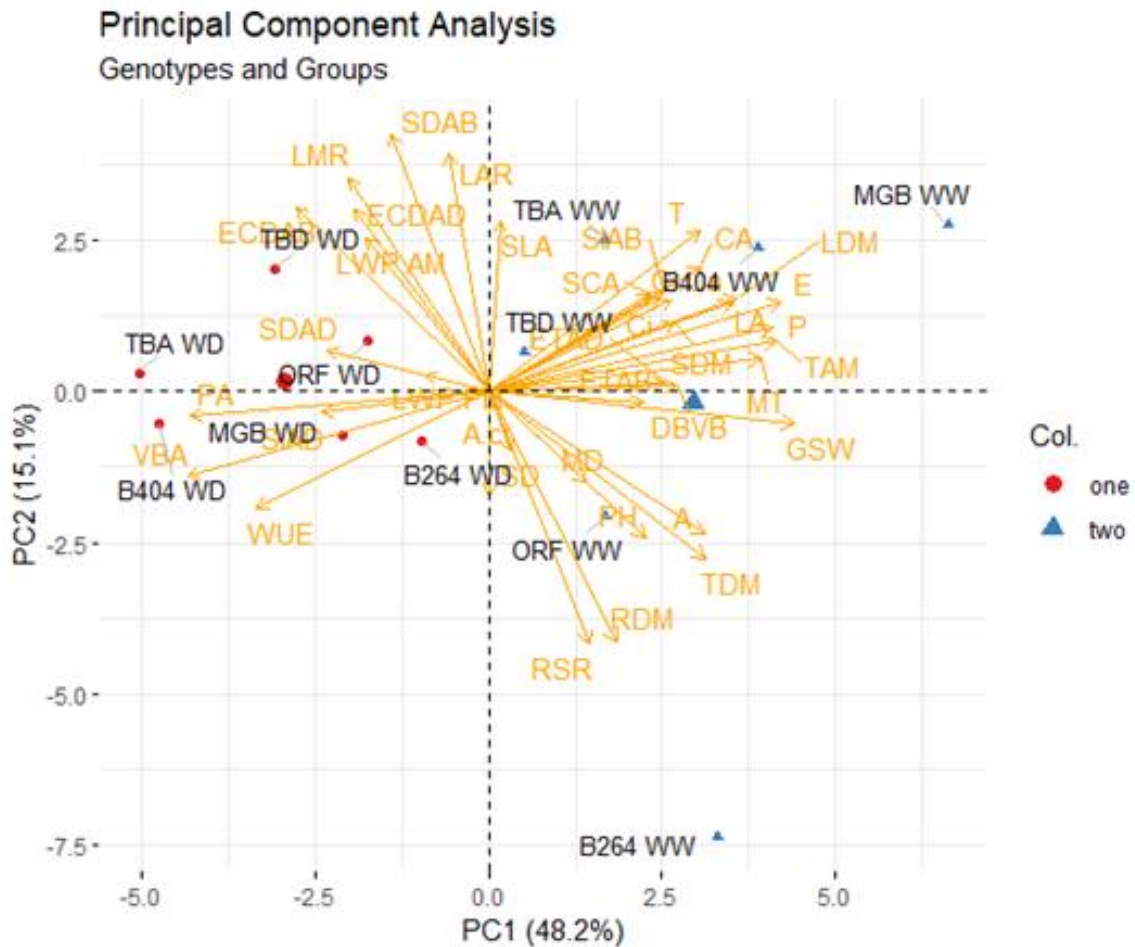
Com base nos resultados obtidos na análise dos componentes principais, os respectivos autovalores e porcentagens da variância explicada por cada um estão apresentados na Tabela 1. Os dois primeiros componentes principais foram responsáveis por 63,03 % da variação total. O componente principal 1 (CP1) e o componente principal 2 (CP2) contribuíram com 15,1% e 48,3%, respectivamente, da variância remanescente (Tabela 14 e figura 4).

Tabela 14. Componentes principais (CPs), autovalores (λ_i) e porcentagem da variância explicada e proporção acumulada (%) pelos componentes.

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11
Eigenvalues	18.363	5.745	4.190	2.521	2.028	1.627	1.387	1.032	0.548	0.324	0.237
Proportion% of var.	48.323	15.118	11.026	6.634	5.336	4.282	3.651	2.716	1.442	0.852	0.623
Cumulative % of var.	48.323	63.440	74.466	81.100	86.435	90.717	94.368	97.083	98.525	99.377	100.000

Analisando a PCA, o grupo (1), sua similaridade em suas variáveis está somente nos genótipos que estavam nas condições de déficit hídrico (WD), o grupo (2) resultou em uma similaridade em suas variáveis para os genótipos que estavam somente nas condições normais de irrigação (WW). (Figura 4). Em nosso estudo as variáveis que deram interação entre os genótipos na condição de déficit hídrico, e que estão presentes no genótipo Tbio Aton, Tbio duque e ORS Feroz, foram: SDAD, densidade estomática adaxial, ECDAD, densidade de células epidérmicas adaxial e ECDAB, densidade de células epidérmicas abaxial; LMR, razão de massa foliar; PA, área do floema, LWPam potencial hídrico foliar antes do meio dia e LWPpm, potencial hídrico foliar ao meio dia. sendo que estas variáveis estão na CP2 (Figura 5).

Figura 4. Gráfico biplot da análise de componentes principais dos genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD).



Abreviaturas: B404, BRS 404; MGB, MGS Brillhante; B264, BRS 264; TBA, Tbio Aton; TBD, Tbio Duque, ORF; ORS Feroz; Ci/Ca, proporção de carbono interno e externo; g_{sw} , condutância estomática; Ci, concentração intercelular de CO_2 ; TDM, massa seca total; LDM, massa seca foliar; E, transpiração; T, perfilhos; SDM, massa seca da parte aérea; RDM, massa seca da raiz; MT, espessura do mesofilo; LA, área foliar total; TAM, Área total da nervura central; P, conteúdo de prolina foliar; DBVB, distância entre os feixes vasculares no mesofilo; SIAB, Índice estomático abaxial; MD, diâmetro do metaxilema; RSR; razão raiz/ parte aérea; A, taxa fotossintética líquida; SCA, área da cavidade subestomática; ETAD, espessura da epiderme adaxial; CA, área do colênquima; ETAB espessura da epiderme abaxial; PH, altura das plantas; SLA, área foliar específica; WUE, eficiência no uso da água; VBA, área do feixe vascular; PA, área do floema; LWPam, potencial hídrico foliar antes do amanhecer; SDAD, densidade estomática adaxial; LWPpm, potencial hídrico foliar ao meio-dia; ECDAB, densidade de células epidêmicas abaxial; ECDAD, densidade de células epidêmicas adaxial; LMR, razão de massa foliar; SIAD, índice estomático adaxial; SDAB, densidade estomática adaxial; A/Ci, eficiência instantânea de carboxilação e LAR, razão de área foliar.

4 DISCUSSÕES

Em nosso estudo, observamos o efeito de dois regimes hídricos em seis genótipos de trigo. A produção de genótipos de trigo de alto rendimento em ambientes secos demanda não apenas considerações agronômicas, mas também a identificação baseada em características morfofisiológicas e anatômicas, visando identificar genótipos promissores para aprimoramento com foco na tolerância ao déficit hídrico. O estresse por déficit hídrico tem fortes efeitos contrastantes nas características morfofisiológicas, e anatômicas das plantas. De acordo com os nossos resultados, houve uma diminuição na altura das plantas, perfilhamento, massa seca da parte aérea e da raiz em todos os genótipos avaliados no déficit hídrico. A escassez de água tem impactos negativos em vários aspectos do crescimento das plantas, incluindo a altura, área foliar, o desenvolvimento radicular, a biomassa seca tanto da parte aérea quanto das raízes e perfilhos (Anjum et al., 2011).

Dentre os atributos agronômicos que influenciam na produtividade, estão à altura da planta, o número de espigas por planta e a quantidade de perfilhos produtivos. O número de perfilhos produtivos por planta desempenha um papel crucial na determinação da quantidade de sementes por planta em variedades de trigo, sendo um componente essencial para o rendimento de grãos (Li; Chen; Wu, 2011). Para todos os genótipos o déficit hídrico afetou no seu número de perfilhos. O perfilhamento reduzido pode ser uma estratégia útil de armazenamento de água em ambientes semiáridos com limitação de água previsível (Blum, 2005), entretanto não podemos afirmar que esses genótipos obtiveram uma relação direta a resistência ao estresse, isso envolve a avaliação da quantidade de grãos por espiga em cada perfilho produtivo do trigo.

A altura das plantas, área foliar, massa seca das folhas e massa seca total houve uma redução isto indica que todos os genótipos no déficit hídrico foram afetados pelas trocas gasosas, mesmo o C_i/C_a baixo e a A/C_i sem alterações. Em condições de déficit hídrico, a relação C_i/C_a tende a diminuir. Isso ocorre porque, durante o déficit hídrico, as plantas geralmente fecham os estômatos para reduzir a perda de água por transpiração. Quando os estômatos estão fechados, a entrada de CO_2 para a fotossíntese é limitada, o que pode levar a uma diminuição na concentração interna de CO_2 (C_i) em relação à concentração atmosférica de CO_2 (C_a), resultando em uma relação C_i/C_a menor (Yavas et al., 2023). No entanto, com a baixa disponibilidade de CO_2 interno a A , g_{sw} , E e A/C_i pode ser afetada (Zhao et al., 2020), corroborando com a diminuição da biomassa em todos os genótipos em estudo sob déficit hídrico.

A razão raiz/parte aérea não teve interação para a maioria dos genótipos no déficit hídrico, exceto o genótipo BRS 264 que reduziu a RSR no déficit hídrico, na qual não podemos correlacionar quanto a sua resistência à seca. A resposta ao estresse pode levar tanto a um aumento quanto a uma redução na massa da raiz. Mesmo com uma redução na massa radicular em déficit hídrico, pode resultar em um aumento no comprimento e na profundidade das raízes (Pires et al., 2020). Conseqüentemente, a relação entre a matéria seca da raiz total e a matéria seca da parte aérea não se mostra útil na seleção de genótipos resistentes ao déficit hídrico (Blum, 2005).

A área foliar específica é uma das respostas morfológicas importantes da planta ao déficit hídrico. Componentes específicos da área foliar desempenham um papel importante na fotossíntese, pois determinam o fluxo e a distribuição de fótons dentro das folhas, limitando o mesofilo à difusão de CO₂ para locais de carboxilação em cloroplastos, especialmente sob condições de estresse (Velikova et al., 2020b). As respostas em nosso estudo de LAR, e SLA, para os genótipos BRS 404, MGS Brillhante e Tbio Duque ocorreu redução no déficit hídrico, estas variáveis não expressam uma resposta plausível para a explicação sobre a resistência ao déficit hídrico desses genótipos, sendo que estas variáveis tem relações com a sua área foliar e a taxa fotossintética líquida, na qual foi bem reduzida para todos os genótipos.

A maior média de *WUE* em nossos resultados em todos os genótipos no déficit hídrico, está relacionado a um menor consumo de água, pois quando a *WUE* é baixa indica que as plantas tiveram um consumo maior de água (Farooq et al., 2009). Conforme nossos resultados no déficit hídrico as baixas taxas de g_{sw} , a densidade estomática e no índice estomático em todos os genótipos sob déficit hídrico não foi alterada, sendo assim proporcionou um maior controle estomático para perda de água. Esse fechamento estomático ajuda a conservar a água dentro da planta, melhorando assim a eficiência no uso da água. Estudos é mostrado que a *WUE* é uma característica fisiológica importante que pode melhorar o rendimento das culturas sob condições hídricas limitadas (Varga et al., 2015). Esta característica é considerada um parâmetro importante para medir o nível de tolerância ao déficit hídrico nas culturas (Zhao et al., 2020). Em nossos resultados de todos os genótipos no déficit hídrico, corrobora com um estudo feito por Tavares et al., (2023), sobre o índice fisiológico e agrônômico em genótipos de trigo, onde seus resultados mostraram que uma maior eficiência no uso da água estava nos genótipos sob déficit hídrico.

Em relação a espessura do mesofilo e a área total da nervura central, a maioria dos genótipos responderam ao déficit hídrico com redução significativa, exceto o genótipo BRS 264, não alterou sua espessura sob estresse. Portanto não podemos inferir este resultado sendo

uma característica de tolerância ao déficit hídrico neste genótipo, portanto os resultados fisiológicos foram afetados. O déficit hídrico afeta a desidratação das células do mesofilo, que está relacionado a diminuição da condutância hidráulica foliar, no entanto ocorre o fechamento dos estômatos e causa danos aos órgãos fotossintéticos (Zagoto; Violita, 2019). Em plantas resistentes ao déficit hídrico, a espessura das folhas aumentou sob condições de déficit hídrico, resultando em um aumento da densidade do mesofilo (Pires et al., 2020; Taratima et al., 2020). Em comparação com as plantas suscetíveis ao déficit hídrico, as folhas das plantas são adaptadas ao déficit hídrico, geralmente apresentam células alongadas e mais compactadas, e as células do parênquima clorofiliano mais finas (Yavas et al., 2023), sendo que este resultado corrobora para os genótipos BRS 404, MGS Brilhante, Tbio Duque, Tbio Aton e ORS Feroz.

Um fator importante encontrado em nosso estudo está na área do floema, todos os genótipos apresentaram a mesma resposta, sendo que o déficit hídrico não interferiu no tamanho da área, sendo que o genótipo BRS 404, Tbio Aton e Tbio Duque aumentaram ainda mais a área do floema em relação às plantas irrigadas. O tecido do floema está interligado ao xilema e, conseqüentemente, diante das variações no potencial hídrico desencadeado pelo déficit hídrico, as plantas desencadeiam ações para manter o equilíbrio osmótico entre esses dois tecidos vasculares (Sevanto, 2018). Elas aumentam a carga de açúcares e aminoácidos no floema, o que, combinado com o controle do fechamento estomático, desempenha um papel crucial na regulação das relações hídricas internas (Blicharz et al., 2021). O aminoácido prolina em nossos resultados, como nos genótipos BRS 404, MGS Brilhante diminuíram no estresse, não era o esperado por ser genótipos para biotipo sequeiro, sendo que para os biotipos irrigados o déficit hídrico não alterou seus resultados.

O diâmetro do metaxilema sob déficit hídrico, foram maiores para os genótipos BRS 404, BRS 264 e Tbio Aton e maiores no déficit hídrico comparado com as plantas irrigadas, portanto não podemos inferir que esta relação é de resistência ao déficit hídrico, pois a redução na área do tecido vascular sugere maior capacidade das plantas em manter o transporte de água e redução da possibilidade de cavitação sob deficiência hídrica, uma vez que a embolia é uma das principais causas de morte das plantas durante ao déficit hídrico (Choat et al., 2016).

De acordo com essas características de resistência ao déficit hídrico situada na CP2, nosso estudo mostra que os genótipos avaliados no déficit hídrico mostraram uma certa resistência a evitar o déficit hídrico, pelo motivo que houve um aumento na WUE, baixa taxa de transpiração, baixa taxa fotossintética, isso ocorreu em todos os genótipos em déficit hídrico, além de algumas características anatômicas como a densidade estomática adaxial e abaxial, densidade de células epidérmicas abaxial e adaxial, área do feixe vascular, área do floema e

baixo potencial hídrico foliar. O estudo de caracterização de genótipos de trigo quanto a sua tolerância feito por Soares et al., (2021), mostrou que o biotipo irrigado BRS 264, obteve baixos rendimentos no tratamento com déficit hídrico, O biotipo sequeiro BRS 404, foi mais produtivo sob estresse moderado. Isso mostra mais uma vez que esses dois genótipos não são tolerantes ao déficit hídrico a 30% da capacidade de campo, pois eles evitam o déficit hídrico.

Muitas vezes quando se consideram os aspectos agronômicos como tolerância a ao déficit hídrico, estamos analisando a capacidade da planta de produção sob condições de déficit hídrico. Isso inclui a produtividade, a qualidade dos grãos, a resistência a doenças e pragas e a capacidade de recuperação após períodos de déficit hídrico (Silva et al., 2016). Em termos morfofisiológicos e anatômicos de acordo com Levitt (1972), a resistência ao déficit hídrico é determinada por 'evitar a desidratação' e/ou 'tolerância à desidratação'. Evitar o déficit hídrico está muito correlacionado ao fechamento estomático, taxa de transpiração baixa, aumento na eficiência no uso água para evitar a desidratação (Hassan et al., 2023). A tolerância ao déficit hídrico está relacionada a elasticidade no crescimento radicular, aumento na resistência protoplasmática, aumento na condutância estomática e taxa fotossintética, aumento na condutividade hidráulica, ajustes osmóticos, acúmulo de açúcares solúveis e os aminoácidos como a prolina. (Das; Roychoudhury, 2014; Hassan et al., 2023; Hu; Xiong, 2014; Mangrauthia et al., 2017; Panda; Mishra; Behera, 2021). No entanto, podemos analisar os genótipos quanto a sua resistência ao déficit hídrico a 30% da capacidade de campo, não teve nenhum genótipo tolerante ao déficit hídrico com essas características de tolerância.

No geral, a nossa hipótese de que as plantas expressam características que permitem uma melhor resistência para adaptar ao déficit hídrico, permanece confirmada, no entanto vale ressaltar que essas características anatômicas e morfofisiológicas de resistência apresentadas por todos os genótipos em estudo são importantes para o cultivo onde ocorre um período bem curto de déficit hídrico e com capacidade de campo maior que 30%, pois elas evitam e não toleram o estresse pelos baixos rendimentos morfológicos e fisiológicos a 30% de capacidade de campo.

5 CONCLUSÕES

A resistência ao déficit hídrico em plantas é uma característica complexa, envolvendo mudanças morfofisiológicas e anatômicas. Nossos resultados destacam os genótipos BRS 404, MGS Brilhante, Tbio Aton e Tbio Duque como mais promissores em algumas características sob déficit hídrico, fornecendo direções para futuras pesquisas e melhoramento genético. No entanto, observamos um desempenho inferior em termos de rendimento sob déficit hídrico, sugerindo uma resistência limitada, com capacidade de campo estabelecida em 30%.

REFERÊNCIAS

- Abdelkader, M.A.; El-Gabry, Y.A.G.; Sayed, A.N.; Shahin, M.G.; Darwish, H.A.; Aboukota, M.E.; Hashem, F.A.E.; Abd-Elrahman, S.H. (2022). **Evaluation of physio-biochemical criteria in maize inbred lines and their F1 hybrids grown under water-deficit conditions.** *Ann. Agric. Sci.*, 67, 220–231. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2022.12.002>.
- Anjum, S. A. et al. **Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress.** *African Journal of Agricultural Research*, v. 6, n. 9, 2011.
- Avramova, V.; Nagel, K.A.; Abdelgavad, H.; Bustoa, D.; Duplessis, M.; Fiorani, F.E.; Beemster, G.T.S. (2016). **Screening for drought tolerance of maize hybrids by multi-scale analysis of root and shoot traits at the seedling stage.** *Journal of Experimental Botany* 67: 2453–2466. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw055>.
- Bates LS, Waldren RP & Teare ID (1973). **Rapid determination of free proline for water-stress studies.** *Plant and soil*, 39(1), 205-207.
- Ben Rejeb, K., Abdelly, C., & Savouré, A. (2014). **How reactive oxygen species and proline face stress together.** *Plant Physiology and Biochemistry*, 80, 278–284. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.04.007>.
- Blicharz, S. et al. (2021). **Phloem exudate metabolic content reflects the response to water-deficit stress in pea plants (*Pisum sativum* L.).** *The Plant Journal*, v. 106, n. 5, p. 1338–1355.
- Blum, A. (2005). **Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive?.** *Australian Journal of Agricultural Research*, v. 56, n. 11, p. 1159.
- Choat, B. et al. (2016). **Noninvasive Measurement of Vulnerability to Drought-Induced Embolism by X-Ray Microtomography.** *Plant Physiology*, v. 170, n. 1, p. 273–282.
- Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Portal de Informações Agropecuárias.** 2022.
- Das, K.; Roychoudhury, A. (2014). **Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants.** *Frontiers in Environmental Science*, v. 2, 2..
- Dolferus R, Ji X and Richards RA. (2011). **Abiotic stress and control of grain number in cereals.** *Plant Sci* 181: 331–341. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.05.015>.
- Erenstein, O.; Jaleta, M.; Mottaleb, K.A.; Sonder, K.; Donovan, J.; Braun, H.J. (2022). **Global trends in wheat production, consumption and trade.** In *Wheat Improvement*; Reynolds, M.P., Braun, H.J., Eds.; Springer: Cham, Switzerland; pp. 47–66. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90673-3_4.
- Fahad, S.; Bajwa, A.A.; Nazir, U.; Anjum, S.A.; Farooq, A.; Zohaib, A.; Sadia, S.; Nasim, W.; Adkins, S.; Saud, S.; Ihsan, M.Z.; Alharby, H.; Wu, C.; Wang, D.; Huang, J. (2017). **Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options.** *Frontiers in Plant Science* 8: 1-16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>.

Fang, Y., & Xiong, L. (2015). **General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants.** *Cellular and Molecular Life Sciences*, 72(4), 673–689. <https://doi.org/10.1007/s00018-014-1767-0>.

Farooq, M. et al. (2009). **Plant drought stress: effects, mechanisms and management.** *Agronomy for Sustainable Development*, v. 29, n. 1, p. 185–212.

Feder N & O'Brien TP (1968). **Plant microtechnique: some principles and new methods.** *American Journal of Botany*, 55, (1), 123-142.

Furbank, R.T.; Sharwood, R.; Estavillo, G.M.; Silva-Perez, V.; Condon, A.G. (2020). **Photons to food: Genetic improvement of cereal crop photosynthesis.** *J. Exp. Bot.*, 71, 2226–2238. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa077>.

Hameed, A.; Goher, M.; Iqbal, N. (2010). **Evaluation of seedling survivability and growth response as selection criteria for breeding drought tolerance in wheat.** *Cereal Res. Commun.*, 38, 193–202. <https://doi.org/10.1556/CRC.38.2010.2.5>.

Hassan, M. A. et al. **Drought stress in rice: morpho-physiological and molecular responses and marker-assisted breeding.** *Frontiers in Plant Science*, v. 14, 18 jul. 2023.

Hoagland, D. R.; Arnon, D. I. (1950). **The water culture method for growing plants without soil.** *Calif. Agr. Exp. STA. Cir*, 347p.

Hu, H.; XIONG, L. (2014). **Genetic Engineering and Breeding of Drought-Resistant Crops.** *Annual Review of Plant Biology*, v. 65, n. 1, p. 715–741.

Johansen DA (1940). **Plant microtechnique.** McGraw-Hill Book Company, Inc: London, 530p.

Kapoor, D.; Bhardwaj, S.; Landi, M.; Sharma, S.; Ramakrishnan, M.; Sharma, A. (2020). **The impact of drought in plant metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production.** *Appl. Sci.*, 10, 5692. <https://doi.org/10.3390/app10165692>.

Kapoor, D.; Bhardwaj, S.; LandI, M.; Sharma, S.; Ramakrishnan, M.; Sharma, A. (2020). **The impact of drought in plant metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production.** *Appl. Sci.*, 10, 5692. <https://doi.org/10.3390/app10165692>.

Kartseva, T.; Dobrikova, A.; Kocheva, K.; Alexandrov, V.; Georgiev, G.; Brestič, M.; Misheva, S. (2021). **Optimal nitrogen supply ameliorates the performance of wheat seedlings under osmotic stress in genotype-specific manner.** *Plants* 2021, 10, 493. <https://doi.org/10.3390/plants10030493>.

Korcelski C (2016). **Cultivo do trigo duplo propósito em sistemas silvipastoris.** Dissertação (Mestrado em Agronomia: Agricultura e Ambiente) Universidade Federal de Santa Maria - Frederico Westphalen, 98p.

Leng, G.; Hall, J. (2019). **Crop yield sensitivity of global major agricultural countries to droughts and the projected changes in the future.** *Sci. Total Environ.*, 654, 811–821. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.434>.

Li, P.; Chen, J.; Wu, P. (2011). **Agronomic Characteristics and Grain Yield of 30 Spring Wheat Genotypes under Drought Stress and Nonstress Conditions.** *Agronomy Journal*, v. 103, n. 6, p. 1619–1628.

- Litoriya NS, Modi AR, Talati JG (2018). **Nutritional evaluation of durum wheat with respect to organic and chemical fertilizers.** *Agricultural Research*, v. 7, n. 2, p. 152-157. <https://doi.org/10.1007/s40003-018-0301-2>.
- Lotfi, R.; Abbasi, A.; Kalaji, H.M.; Ieskandari, I.; Sedghieh, V.; Khorsandi, H.; Sadeghian, N.; Yadav, S.; Rastogi, A. (2022). **The role of potassium on drought resistance of winter wheat cultivars under cold dryland conditions: Probed by chlorophyll a fluorescence.** *Plant Physiol. Biochem.*, 182, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.04.010>.
- Majid, S.A.; Asghar, R.; Murtaza, G. (2007). **Yield stability analysis conferring adaptation of wheat to pre-and post-anthesis drought conditions.** *Pakistan Journal of Botany* 39:1623-1637.
- Mangrauthia, S. K. et al. **Genome-wide changes in microRNA expression during short and prolonged heat stress and recovery in contrasting rice cultivars.** *Journal of Experimental Botany*, v. 68, n. 9, p. 2399–2412, 1 abr. 2017.
- Munns, R.; James, R.A.; Sirault, X.R.; Furbank, R.T.; Jones, H.G. (2010). **New phenotyping methods for screening wheat and barley for beneficial responses to water deficit.** *Journal of Experimental Botany* 61: 3499–3507. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq199>.
- Panda, D.; Mishra, S. S.; Behera, P. K. (2021). **Drought Tolerance in Rice: Focus on Recent Mechanisms and Approaches.** *Rice Science*, v. 28, n. 2, p. 119–132.
- Pires, M. V. et al. (2020). **Yield-related phenotypic traits of drought resistant maize genotypes.** *Environmental and Experimental Botany*, v. 171, p. 103962.
- Porter JR, Challinor AJ, Henriksen CB, Howden SM, Martre P and Smith P. (2019). **Invited review: intergovernmental panel on climate change, agriculture, and food—a case of shifting cultivation and history.** *Glob Chang Biol* 25: 2518–2529. <https://doi.org/10.1111/gcb.14700>.
- R Core Team (2020). **R: A Language and Environment for Statistical Computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.r-project.org>
- Ribeiro, G.; Pimente, A.J.B.; Souza, M.A.; Rocha, J.R.A.S.C.; Fonseca, W.B. (2012). **Stress for high temperatures in wheat: impact on development and mechanisms of tolerance.** *Revista Brasileira de Agrociência* 18: 133-142.
- Rocca Da Cunha, G.; Caierão, E.; Técnicos, E. TRIGO E TRITICALE. **Informações Técnicas para 15ª Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale.** [s.l: s.n.]. 2015.
- Rodrigues AC., Amano É, DE Almeida SL (2015). **Anatomia vegetal.** CED/LANTEC/UFSC. Florianópolis, 152p.
- Sevanto, S. (2018). **Drought impacts on phloem transport.** *Current Opinion in Plant Biology*, v. 43, p. 76–81.
- Silva, E. A. (2017). **A cultura do trigo em Minas Gerais.** In: OLIVEIRA NETO, A. A.; SANTOS, C.M. R. (Orgs.). *A cultura do trigo.* Brasília: Conab, p. 57-62.
- Silva, M. S. E et al. (2016). **BRS 404 - wheat cultivar for rainfed conditions.** *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v. 16, n. 1, p. 71–73.

- Soares, G. F. et al. (2021). **Characterization of wheat genotypes for drought tolerance and water use efficiency.** *Scientia Agricola*, v. 78, n. 5, 2021.
- Taratima, W. et al. (2020). **Effect of stress on the leaf anatomy of sugarcane cultivars with different drought tolerance (*Saccharum officinarum*, Poaceae).** *Revista de Biología Tropical*, v. 68, n. 4.
- Tavares, C. J. et al. (2023). **Water Stress Alters Physiological, Spectral, and Agronomic Indexes of Wheat Genotypes.** *Plants*, v. 12, n. 20, p. 3571.
- Tian, H.; et al. (2020). **An IPSO-BP neural network for estimating wheat yield using two remotely sensed variables in the Guanzhong Plain, PR China.** *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 169, p. 105180. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105180>.
- Varga, B. et al. (2015). **Effect of Simulating Drought in Various Phenophases on the Water Use Efficiency of Winter Wheat.** *Journal of Agronomy and Crop Science*, v. 201, n. 1, p. 1–9,14.
- Velikova, V. et al. (2020). **Functional and Structural Leaf Plasticity Determine Photosynthetic Performances during Drought Stress and Recovery in Two *Platanus orientalis* Populations from Contrasting Habitats.** *International Journal of Molecular Sciences*, v. 21, n. 11, p. 3912.
- Yavas, I. et al. (2023). **Drought-Induced Changes in Leaf Morphology and Anatomy: Overview, Implications and Perspectives.** *Polish Journal of Environmental Studies*.
- Zadoks, J. C.; Chang, T. T.; Konzak, C. F. (1974). **A decimal code for the growth stages of cereals.** *Weed Research*, v. 14, n. 6, p. 415–421, 28.
- Zagoto, A. D. P.; VIOLITA, V. (2019). **Leaf Anatomical Modification in Drought of Rice Varieties (*Oryza sativa* L.).** *Eksakta : Berkala Ilmiah Bidang MIPA*, v. 20, n. 2, p. 42–52.
- Zhao, W. et al. (2020). **Effects of Water Stress on Photosynthesis, Yield, and Water Use Efficiency in Winter Wheat.** *Water*, v. 12, n. 8, p. 2127.
- Zhou, X.; et al. (2020). **Reconstruction of time series leaf area index for improving wheat yield estimates at field scales by fusion of Sentinel-2, -3 and MODIS imagery.** *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 177, p. 105692. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105692>.

ARTIGO 3: CARACTERÍSTICAS MORFOANATÔMICAS DO SISTEMA RADICULAR DE GENÓTIPOS DE TRIGO SOB DÉFICIT HÍDRICO

RESUMO

A produtividade do trigo está ameaçada pela incidência imprevisível de eventos climáticos agudos, como a seca. As modificações na anatomia da raiz e na arquitetura do sistema radicular (RSA) são características de resistência à seca que podem minimizar as perdas de rendimento em regiões com chuvas limitadas, conseqüentemente auxilia na identificação de variedades mais resistentes à seca para aprimorar a produção agrícola. Portanto o objetivo do presente estudo foi avaliar as características morfoanatômicas radiculares de seis genótipos de trigo submetidos ao déficit hídrico controlado. O estudo foi desenvolvido sob condições controladas, em casa de vegetação, no delineamento inteiramente casualizado, com 12 tratamentos (duas condições hídricas e seis genótipos), em esquema fatorial (2x6), e com cinco repetições e uma planta por vaso. As avaliações anatômicas e da arquitetura do sistema radicular do trigo sob condições de déficit hídrico no solo a 30% de capacidade de campo, o genótipo do biótipo sequeiro BRS 404, resultou em uma melhor adaptação a resistência a seca através das características anatômicas e arquitetura radicular. Portanto o genótipo biótipo sequeiro MGS Brilhante, promoveram modificações somente nas características anatômicas para a resistência a seca. Sendo que esses genótipos também apresentaram resultados semelhantes no índice de plasticidade fenotípica para as características anatômicas da raiz. Nosso estudo sugere que os genótipos BRS 404 e MGS Brilhante podem ser considerados mais resistentes ao déficit hídrico do que os genótipos do biótipo irrigado BRS 264, Tbio Duque, Tbio Aton e ORS Feroz devido as suas modificações morfoanatômicas.

Palavras-chave: *Triticum aestivum* L.; anatomia da raiz; arquitetura do sistema da raiz; déficit hídrico.

MORPHOANATOMIC CHARACTERISTICS OF THE ROOT SYSTEM OF WHEAT GENOTYPES UNDER WATER DEFICIT

ABSTRACT

The productivity of wheat is threatened by the unpredictable incidence of acute climatic events, such as drought. Changes in root anatomy and root system architecture (RSA) are characteristics of drought resistance that can minimize yield losses in regions with limited rainfall, thereby aiding in the identification of more drought-resistant varieties to enhance agricultural production. Therefore, the objective of this study was to evaluate the morphoanatomical root characteristics of six wheat genotypes subjected to controlled water deficit. The study was conducted under controlled conditions in a greenhouse, using a completely randomized design with 12 treatments (two water conditions and six genotypes), in a factorial scheme (2x6), with five replications and one plant per pot. Anatomical and root system architecture assessments of wheat under soil water deficit at 30% field capacity revealed that the drought-tolerant genotype BRS 404 exhibited better adaptation to drought resistance through its anatomical and root architectural characteristics. Thus, the drought-tolerant genotype MGS Brilhante only promoted modifications in anatomical characteristics for drought resistance. These genotypes also showed similar results in the phenotypic plasticity index for root anatomical characteristics. Our study suggests that the genotypes BRS 404 and MGS Brilhante may be considered more resistant to water deficit than the irrigated genotype types BRS 264, Tbio Duque, Tbio Aton, and ORS Feroz due to their morphoanatomical modifications.

Keywords: *Triticum aestivum* L.; root anatomy; root system architecture; water deficit.

1 INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é uma monocotiledônea representante da família Poaceae, rico em proteínas, carboidratos e minerais (Silva, 2017). O grão de trigo (fruto seco do tipo cariopse) é pequeno (6 a 7 mm), seco e indeiscente (não se abre naturalmente quando maduro). É um alimento básico em todo o mundo, sendo de suma importância na dieta diária, além de ser a fonte de carboidratos de milhões de pessoas (Litoriya et al., 2018). É amplamente cultivado no Brasil, devido ao desenvolvimento de cultivares de alto rendimento, que favorecem o alto consumo mercantil de alimentos com qualidade industrial superior e alto teor nutricional (Battenfield et al. 2016). É um cereal de grande relevância para o país, sendo transformado em farinha. Em 2022 a produção brasileira de trigo para a safra foi de 9,320 milhões de toneladas (Conab, 2022).

No cenário de mudança climática global, o déficit hídrico aumentará em frequência e severidade, tornando-se assim um grande problema para o crescimento e a produção de plantas cultivadas, incluindo o trigo (Leng; Hall, 2019). A produtividade do trigo está ameaçada pela incidência imprevisível de eventos climáticos agudos, como seca, calor, salinidade e CO₂ elevado (Porter et al., 2019). Estes fatores afetam negativamente a economia alimentar global e a qualidade do trigo. As alterações climáticas representam um grande desafio para fornecer de forma consistente o trigo de qualidade no futuro, devido à interação multifacetada entre o CO₂, as ondas de calor e os padrões de chuva. As fases reprodutivas iniciais podem ser prejudicadas, podendo afetar o desenvolvimento do grão e flutuações na composição final (Dolferus et al., 2011).

A arquitetura do sistema radicular (RSA) desempenha um papel crucial no crescimento e desenvolvimento das plantas. O déficit hídrico altera a arquitetura e a morfologia das raízes das plantas agrícolas. Durante condições de estresse abiótico, as biomassas das raízes de muitas plantas aumentam à medida que o comprimento delas se torna mais prolongadas e com a maior absorção de água e minerais do solo (Bhattacharya, 2021). As plantas quando são submetidas a condições de déficit hídrico, suas raízes se alongam no solo, atingindo mais profundamente e absorvendo água e minerais suficientes para sobreviver (Tumová et al., 2018). O ângulo da raiz é uma importante característica adaptativa à seca que direciona a distribuição horizontal e vertical das raízes no solo. Uma forte ligação entre ângulo de raiz íngreme e enraizamento profundo foi relatada em trigo (York, 2018). Um ângulo de raiz estreito pode melhorar o acesso à umidade residual em solos profundos, particularmente sob condições de seca terminal e pode

prolongar o período de enchimento dos grãos para melhorar o rendimento (Alahmad et al., 2019).

As características anatômicas das raízes têm uma influência substancial na absorção de água. Através de camadas concêntricas de células radiculares, primeiro a água entra do solo para o feixe vascular da raiz, depois para o xilema e, finalmente, para o caule (Maurel; Nacry, 2020). As mudanças adaptativas nas principais características anatômicas das raízes, em resposta ao déficit hídrico de cultivares tolerantes de trigo, estão relacionadas à plasticidade do xilema. Um estudo comparativo de arroz (*Oryza sativa*) e trigo (*Triticum aestivum*) por Kadam et al., (2015), revelou que o número/diâmetro do cilindro vascular e do xilema foram mais responsivos às condições de déficit hídrico no trigo do que no arroz devido à plasticidade do desenvolvimento do xilema.

O parênquima cortical tem papel importante no transporte de radial de água nas raízes no modo simplasto e apoplasto, na qual pode possuir barreiras apoplásticas. Como a endoderme que ajuda na proteção do colapso dos tecidos do feixe vascular (Mostajeran; Rahimi-Eic, 2008), enquanto a redução do córtex e o aumento do tamanho das células corticais estão associados a uma maior absorção de água (Chimungu; Brown; Lynch, 2014). Os fenótipos anatômicos das raízes, como diâmetro, área cortical e tamanho dos vasos do xilema, influenciam o custo metabólico da exploração do solo e a taxa de transporte de água e nutrientes nas plantas (Lynch, 2018).

Essas modificações na anatomia da raiz e na arquitetura do sistema radicular (RSA), portanto, é uma característica adaptativa à seca que pode minimizar as perdas de rendimento em regiões com chuvas limitadas e também podem ajudar na identificação de variedades mais resistentes à seca para aprimorar a produção agrícola e que pode ser usado na seleção para o melhoramento genético em banco de germoplasma do trigo. Sendo assim a hipótese do estudo é, existem modificações e diferenciações nos tecidos da raiz do trigo que podem estar relacionadas à melhoria na tolerância à seca, o sistema radicular da raiz do trigo é mais estreito ou amplo para absorção da água em solo seco. Portanto o objetivo do presente estudo foi avaliar as características morfoanatômicas radiculares de seis genótipos de trigo submetidos ao déficit hídrico controlado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local de execução

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, localizada no Departamento de Ciências do Solo e nos Laboratórios de Anatomia Vegetal do Departamento de Biologia, situados na Universidade Federal de Lavras (UFLA).

2.2 Material Vegetal

Os materiais vegetais constituíram de seis genótipos de trigo contrastantes em relação as regiões de adaptação (Rocca da Cunha; Caierão; 2022). Os genótipos de trigo utilizados estão apresentados na (Tabela 1).

Tabela 1. Genótipos utilizados, origem, instituição responsável, região onde são indicados para o cultivo e classe comercial.

Genótipos	Ciclo	Instituição/ano de lançamento	Regiões de Adaptação	Classe comercial indicativa
BRS 404	Precoce/Médio	EMBRAPA/2015	Sequeiro	Pão
BRS 264	Precoce	EMBRAPA/2005	Irrigado	Pão
MGS Brilhante	Precoce	EPAMIG/2005	Sequeiro	Pão
Tbio Aton	Médio	BIOTRIGO/2018	Irrigado/Sequeiro	Pão
Tbio Duque	Precoce	BIOTRIGO/2017	Irrigado/Sequeiro	Pão
ORS Feroz	Precoce	OR Sementes	Irrigado/Sequeiro	Melhorador

Sequeiro: para altitudes acima de 800 m; Irrigado: para altitudes acima de 400 m. Fonte: (Rocca da Cunha; Caierão; 2022)

2.3 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 2×6, com cinco repetições e uma unidade experimental de uma planta de trigo por vaso. Os seis genótipos de trigo foram testados com dois regimes hídricos: Plantas irrigadas (WW) e plantas sob déficit hídrico (WD).

2.4 Condições de cultivo

Sementes de trigo foram germinadas em papel de filtro até que a radícula das plântulas atingisse um comprimento de 2 cm (cerca de três dias a 22-25 °C). As plântulas dos genótipos com aproximadamente o mesmo tamanho foram selecionadas e transferidas para rizotrons (tamanho: tamanho: 42,5x29,5x3,5cm) preenchidos com 2,8 L de areia lavada e substrato comercial Tropstrato (Vida verde®, composição: Casca de Pinus, Vermiculita, PG Mix

14.16.18, Nitrato de Potássio, Superfosfato Simples e Turfa), indicado para floreiras e vasos, na proporção de 1:1. Os rizotrons foram inclinados 43° em direção ao plano horizontal com a placa transparente voltada para baixo para direcionar o crescimento da raiz em direção à placa transparente e melhorar a visualização da raiz. As plantas foram mantidas em casa de vegetação com temperatura controlada de 26 ± 2 °C, umidade relativa variou entre 50% e 70%, densidade média máxima de fluxo de fótons fotossintéticos de $652 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, medida na copa da planta e fotoperíodo de 12h claro e 12h escuro. No primeiro dia do experimento, ambos os grupos de tratamento foram irrigados com solução nutritiva (Hoagland e Arnon, 1950) a 40% de força iônica. Aos 19° dias após o transplantio (DAT), o déficit hídrico moderado foi aplicado no estágio 1.3 do crescimento do trigo pela escala de (Zadoks; Chang; Konzak, 1974). Com o aparecimento das 3 primeiras folhas verdadeiras, submetendo as plantas a 80% da capacidade de campo, aumentando o déficit 20% a cada 7 dias, dos 19 aos 40 DAT, até 30%, e mantida nesse ponto até 51 DAT, com as plantas no início do florescimento (estádio 6.0 de Zadoks), o que permitiu a avaliação morfológica, efeitos anatômicos e fisiológicos do déficit hídrico.

Durante o 13° ao 51° DAT, a umidade do composto foi monitorada usando sensores resistivos de umidade com um módulo comparador de tensão LM393 e microcontrolador Arduino Mega 2560 que poderia acionar automaticamente as bombas de irrigação assim que a umidade do composto atingisse um valor de resistência predeterminado específico para cada regime de água. As sondas do sensor de umidade foram posicionadas e duas estacas gotejadoras na parte inferior e superior do rizotron, respectivamente.

2.5 Ângulo do sistema radicular

As imagens foram obtidas aos 51 DAT, por varredura dos rizotrons usando Scanner (1200S, Mustek, China). Usando o software de imagens ImageJ e o software Corel Photo Paint X7, as imagens foram processadas. No ImageJ as imagens foram empilhadas em uma projeção de pilhas Z (mediana), onde foi realizada para obter os valores médios de intensidade de escala de cinza de 5 imagens. O ângulo do sistema radicular foi obtido entre o início da raiz principal na borda superior do composto e o limite das raízes secundárias na lateral do vaso rizotron, posteriormente foi medido com o software imageJ.

2.6 Análises anatômicas radiculares

No final do período experimental, aos 51 DAT, foi coletada a raízes do ápice radicular com aproximadamente 20 cm de comprimento e fixadas em FAA a 70% (Johansen, 1940), posteriormente foram realizadas secções transversais nas posições de 8, 10, 12 e 14 cm, a partir

da coifa em direção à base radicular, submetidas à desidratação por meio de soluções com concentração crescente de etanol (70, 80, 90 e 100%), com intervalos de 2 horas em temperatura ambiente. Posteriormente foram infiltradas por 24 horas em historesina (Leica Microsystems, Heidelberg, Alemanha), submetidas a cortes transversais (espessura de 7 μm), com auxílio de micrótomo rotativo semiautomático, coradas com azul de toluidina à 0,05% (w/v) (Feder e O'Brien, 1968) e montadas em lâminas permanentes com Entellan (Merck, Darmstadt, Germany). As lâminas foram fotografadas com câmera acoplada ao microscópio (Eclipse E100-LED; Nikon, Tóquio, Japão). Os dados anatômicos quantitativos foram obtidos com auxílio do software ImageJ e ocorreram nos cortes de 14 μm , a partir da coifa, nos quais todos os tecidos estavam diferenciados. As seguintes características anatômicas foram avaliadas no corte transversal da raiz: área total da secção transversal, área do cilindro vascular, área do córtex, espessura da epiderme, espessura da endoderme, área do metaxilema, diâmetro e número de protoxilema.

2.7 Índice de plasticidade de distância relativa (RDPI)

O índice de plasticidade de distância relativa (RDPI) foi calculado para todas as variáveis analisadas, conforme descrito por Valladares et al., (2006). Foram testados cinco indivíduos de cada genótipo de trigo por bloco ($j = 1, 2, 3, 4, 5$) em cada regime hídrico ($i = 1, 2$).

A plasticidade fenotípica para uma dada variável x pode estar relacionada à diferença de x entre dois indivíduos (j e j') do mesmo genótipo cultivados sob diferentes condições, por exemplo, déficit hídrico e irrigadas (i e i') (Marchiori et al., 2017). O RDPI foi calculado como $\sum(d_{ij} \rightarrow i'j' / (xi'j' + x_{ij})) / n$ onde n é o número de distâncias e foi descrito anteriormente (Valladares et al., 2006). O RDPI foi calculado com os dados para cada variável x obtida dos 51 DAT.

2.8 Análises estatísticas

Os dados foram testados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk. As médias foram submetidas à análise de variância (ANOVA), seguido do teste Scott-Knott. As médias do índice de plasticidade de distância relativa (RDPI) e ângulo da raiz, foram submetidas a análise de variância (ANOVA), seguido do teste de Tukey. Todas as análises foram realizadas com auxílio do software Sisvar 5.0 (Ferreira, 2011).

3 RESULTADOS

3.1 Características anatômicas da raiz

A área da seção transversal das raízes não apresentou diferença significativa entre os genótipos na mesma condição de déficit hídrico, porém no tratamento irrigado os genótipos BRS 404 e BRS 264 apresentaram um aumento em sua área da secção transversal da raiz. Analisando os genótipos individualmente, essa variável no tratamento sob deficiência hídrica apresentou uma redução para todos os genótipos em comparação com o tratamento irrigado (Fig. 1a, 3). Para a área do córtex da raiz não apresentou diferença significativa entre os genótipos no tratamento irrigado. No entanto, no tratamento sob déficit hídrico os genótipos Tbio duque e Tbio Aton aumentou a área do córtex em comparação com outros genótipos. Analisando os genótipos individualmente, somente o genótipo BRS 404 reduziu sua área no córtex da raiz sob déficit hídrico (Fig. 1b, 3g).

Resultado semelhante ocorreu para a área do cilindro vascular e a área do vaso do metaxilema no tratamento sob déficit hídrico. Foi observado que houve um aumento para o genótipo BRS 404 em comparação com os outros genótipos. Analisando os genótipos individualmente, somente os genótipos BRS 404 e MGS Brilhante sob déficit hídrico, apresentaram um aumento na área do cilindro vascular em relação ao tratamento irrigado (Fig. 1c, d, 3g e i).

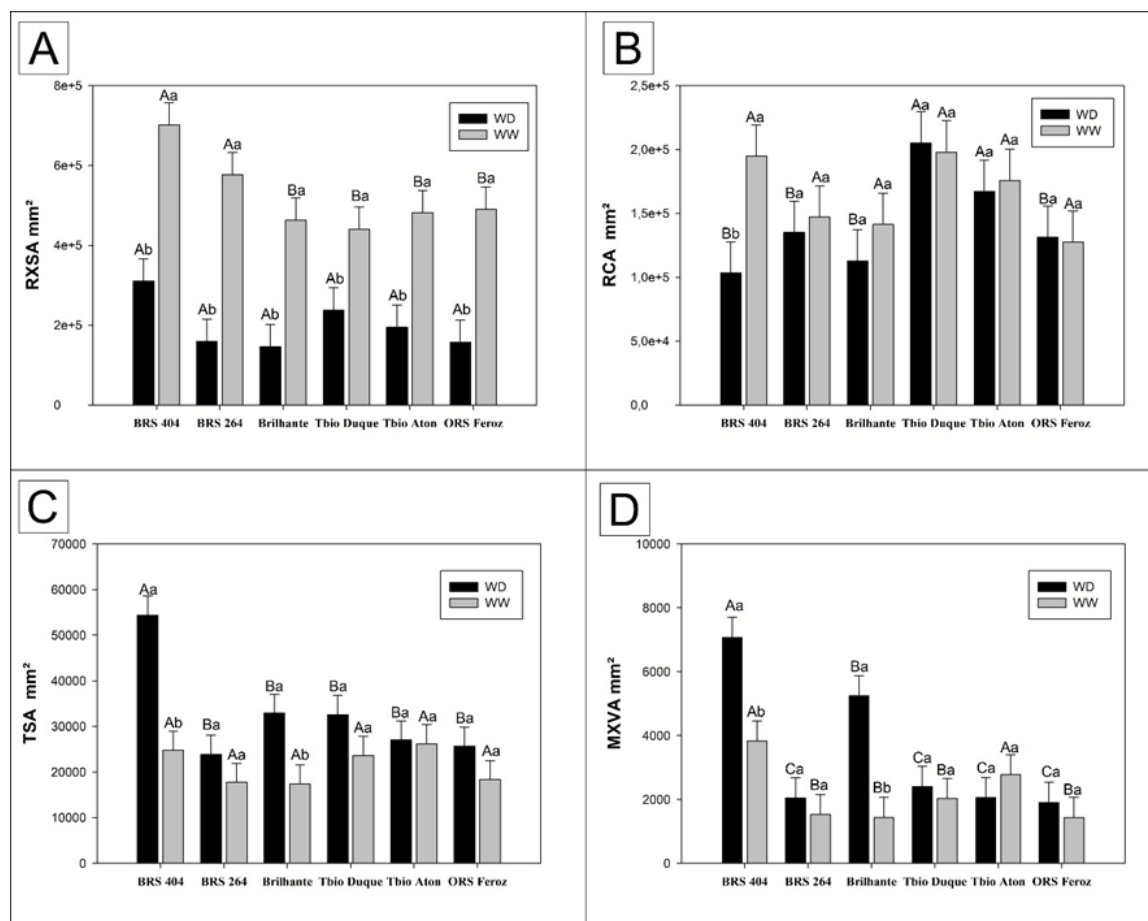


Figura 1. Características anatômicas da raiz dos genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD). As médias seguidas de letras iguais, maiúscula entre genótipos e minúscula para as condições hídricas, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Barras = Erro padrão. Abreviaturas: RXSA, área total da secção transversal da raiz; RCA, área do córtex da raiz; TSA, área do cilindro vascular; MXVA, área do vaso de metaxilema.

Para a espessura da epiderme da raiz, no tratamento irrigado todos os genótipos apresentaram resultados semelhantes, no entanto, sob déficit hídrico os genótipos BRS 404 e MGS Brillhante apresentaram as maiores médias comparando entre os genótipos e individualmente entre as condições hídricas (Figura 2a, 3g, i). Para a espessura da endoderme da raiz, no tratamento irrigado todos os genótipos apresentaram resultados semelhantes. No entanto, sob déficit hídrico, o genótipo BRS 404 aumentou sua espessura da endoderme comparando entre genótipos e individualmente entre as condições hídricas (Fig. 2b, 3g).

O diâmetro do protoxilema da raiz, no tratamento irrigado todos os genótipos apresentaram resultados semelhantes, no entanto, sob déficit hídrico os genótipos BRS 404 e MGS Brillhante apresentaram as mesmas respostas reduzindo o seu diâmetro frente ao déficit hídrico (Fig. 2c, 3g, i). Já em relação ao número de protoxilema da raiz, observou um aumento para os genótipos BRS 404, MGS Brillhante e Tbio aton sob déficit hídrico. Analisando os

genótipos individualmente entre os tratamentos irrigados e déficit hídrico, somente os genótipos BRS 404 e MGS brilhante obteve um número maior de protoxilema da raiz no déficit hídrico (Fig. 2d, 3g, i).

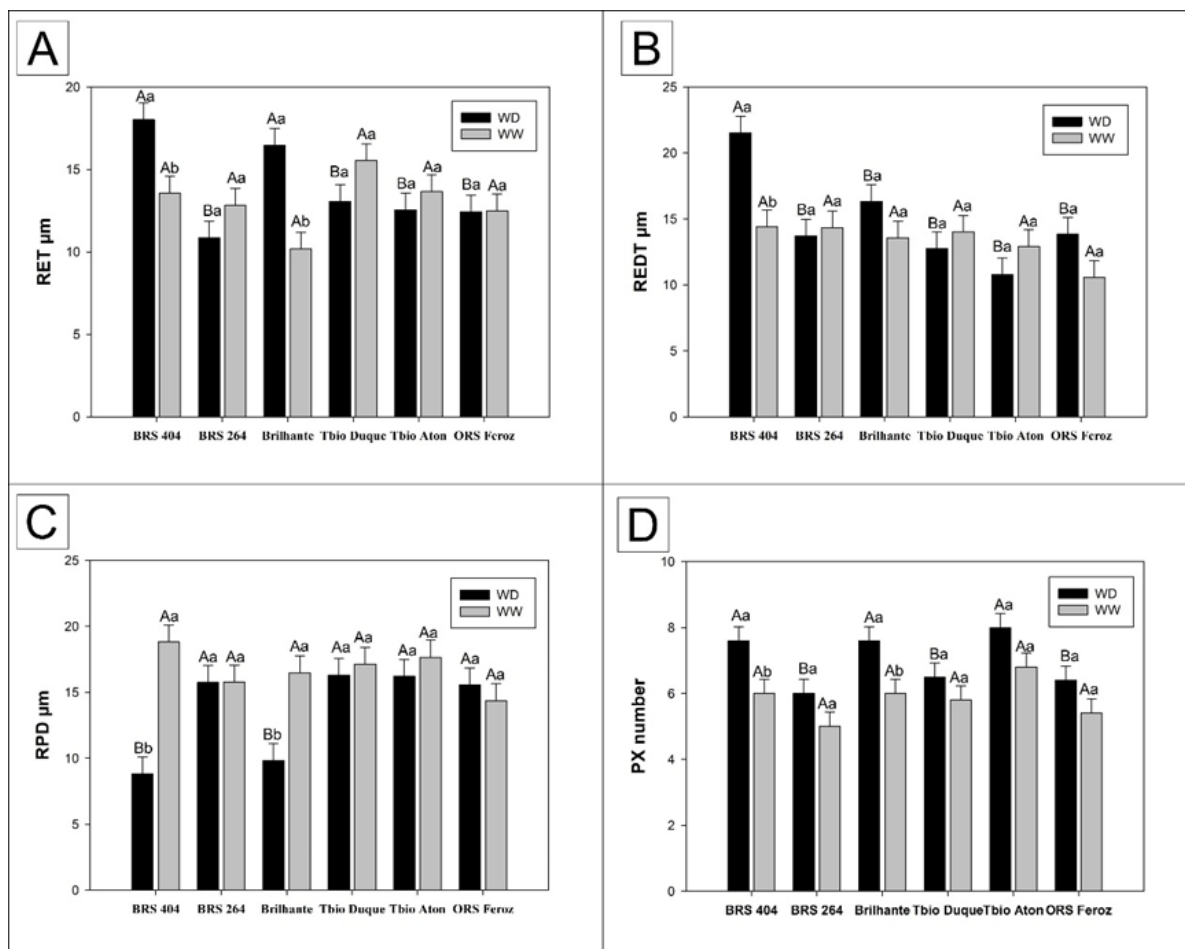


Figura 2. Características anatômicas da raiz dos genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD). As médias seguidas de letras iguais, maiúscula entre genótipos e minúscula para as condições hídricas, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Barras = Erro padrão. Abreviaturas: RET, espessura da epiderme da raiz; REDT; espessura da endoderme da raiz; RPD, Diâmetro do protoxilema da raiz; PX number; número de protoxilema na raiz.

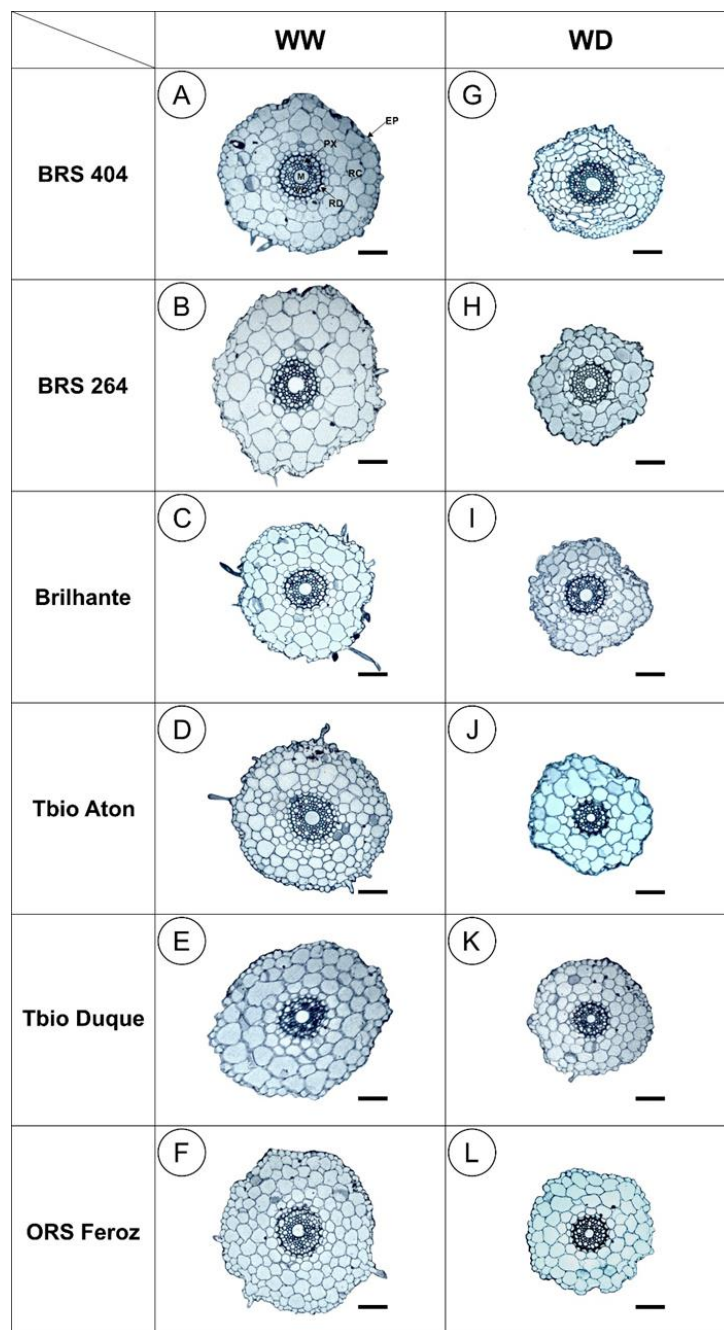


Figura 3. Secções transversais de raízes dos genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD). Barras 100 μ m. Abreviaturas: M, vaso do metaxilema da raiz; PX, vaso do protoxilema da raiz; VC, cilindro vascular da raiz; RD, endoderme da raiz; RC, córtex da raiz e EP, epiderme da raiz.

3.2 Ângulo da raiz

O ângulo do sistema radicular de todos os genótipos foi mais estreito sob déficit hídrico comparado ao tratamento irrigado (Fig. 4 e Fig. 5). Por outro lado, o sistema radicular do genótipo BRS 404 no tratamento sob déficit hídrico, apresentou um ângulo mais estreito que os

demais genótipos (Fig. 4 e 5b). No tratamento irrigado o genótipo BRS 264 atingiu ângulo maior aos demais genótipos (Fig. 4 e 5c).

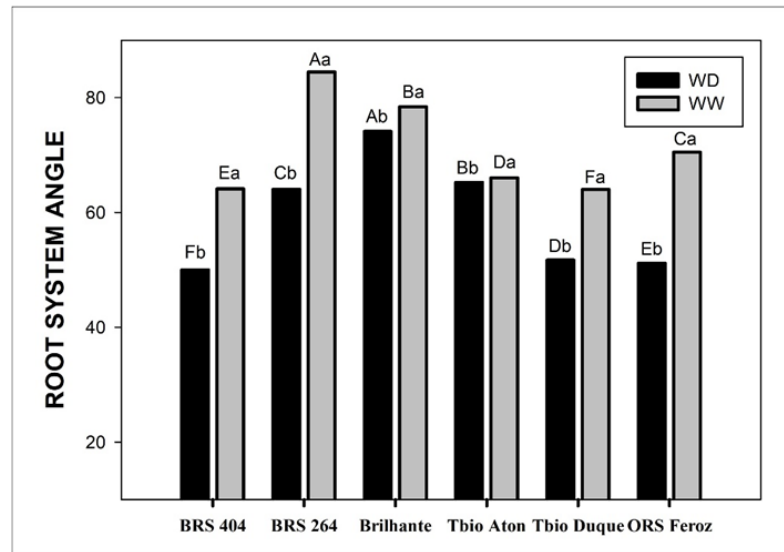


Figura 4. Médias dos ângulos do sistema radicular dos genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD). As médias seguidas de letras iguais, maiúscula entre genótipos e minúscula para as condições hídricas, não diferem entre si pelo teste de tukey ($P \leq 0,05$). Barras = Erro padrão.

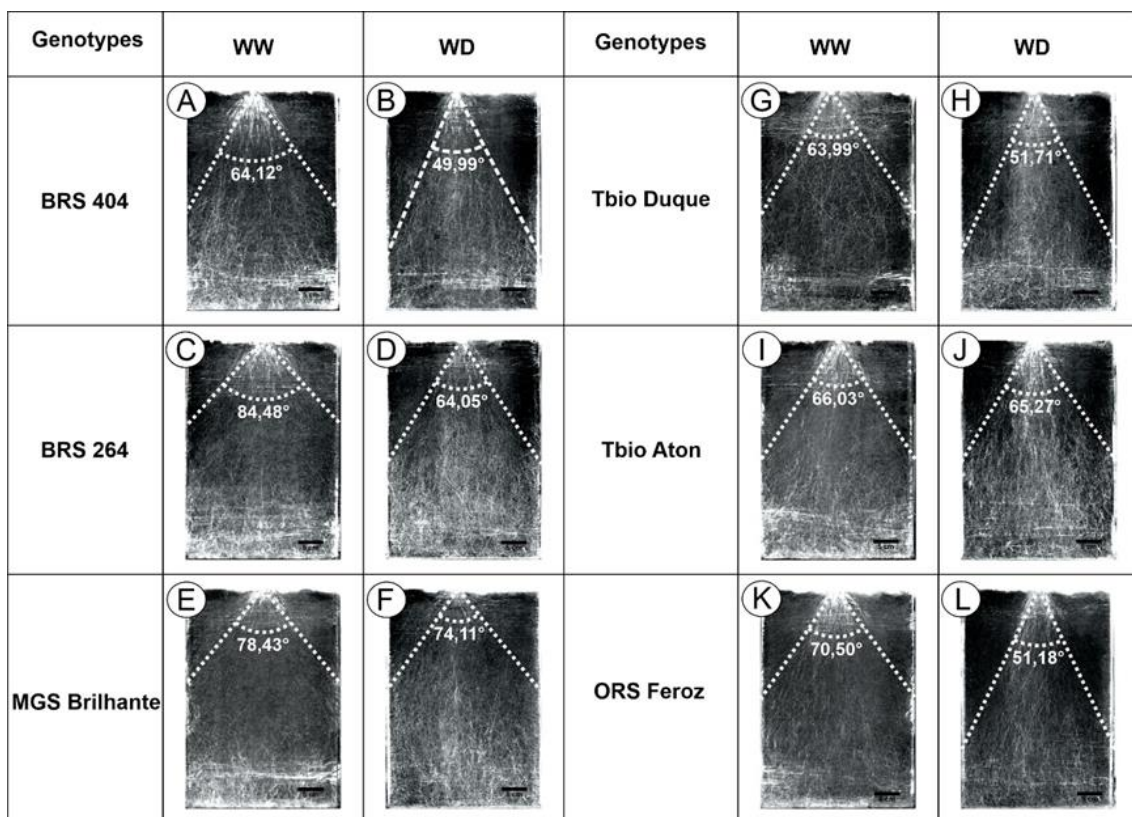


Figura 5. Ângulo do sistema radicular dos genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD).

3.3 Índice de plasticidade de distância relativa (RDPI)

Os genótipos BRS 404 e MGS Brilhante apresentaram os mesmos resultados, mostrando uma maior plasticidade nas características fenotípicas: área do vaso de metaxilema (MXVA); área do córtex da raiz (RCA) e diâmetro do protoxilema da raiz (RPD) (Fig. 6). No entanto, todos os genótipos apresentaram resultados semelhantes nas características fenotípicas: área da secção transversal da raiz (RXSA); área do cilindro vascular (TSA); espessura da epiderme da raiz (RET); espessura da endoderme da raiz (REDT) e número de protoxilema (Fig. 6).

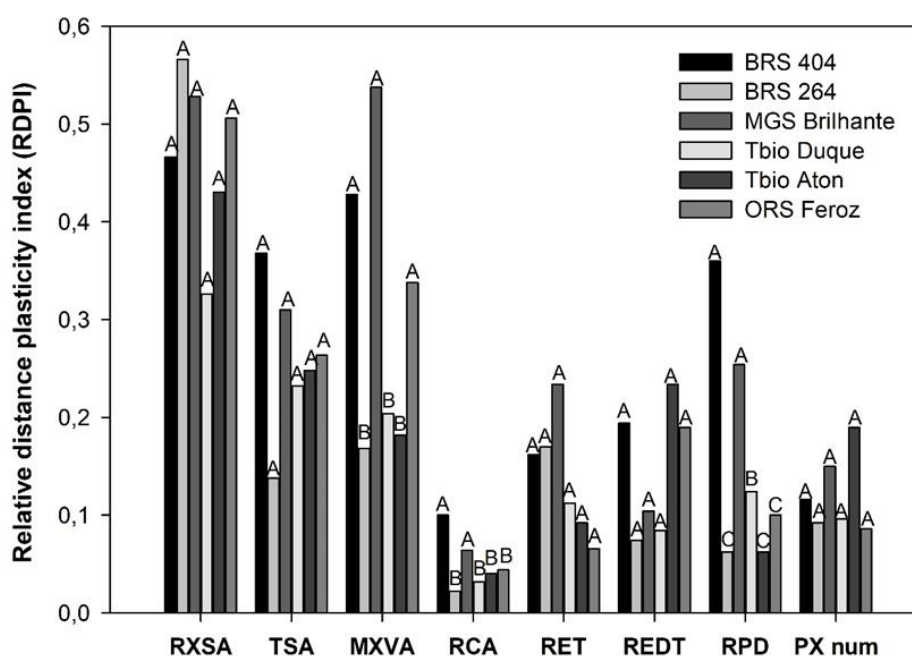


Figura 6. Índice de plasticidade de distância relativa (RDPI) da raiz dos genótipos de trigo, cultivados em casa de vegetação sob condições normais de irrigação (WW) e sob déficit hídrico (WD). As médias seguidas de letras iguais, não diferem entre si pelo teste de tukey ($P \leq 0,05$). Abreviaturas: RXSA, área total da secção transversal da raiz; RCA, área do córtex da raiz; TSA, área do cilindro vascular; MXVA, área do vaso de metaxilema; RET, espessura da epiderme da raiz; REDT; espessura da endoderme da raiz; RPD, diâmetro do protoxilema da raiz; PX number; número de protoxilema na raiz.

4 DISCUSSÕES

Durante o estudo, observamos uma série de respostas das plantas ao déficit hídrico, incluindo modificações na anatomia e arquitetura radicular relacionadas ao déficit hídrico. Essas descobertas fornecem insights importantes sobre como as plantas respondem e se toleram ao déficit hídrico, o que pode ser útil para o desenvolvimento de culturas mais resistentes à seca no futuro.

Assim, as características avaliadas, como área do cilindro vascular, área do vaso do metaxilema, área do córtex da raiz, espessura da epiderme e endoderme da raiz, diâmetro e número do protoxilema e ângulo da raiz, que são envolvidos nos mecanismos de absorção de água, promoveu alterações estruturais e anatômicas sob condições controladas de déficit hídrico. Portanto, sob condições de déficit hídrico controlado, é esperado que essas características sofram modificações estruturais e anatômicas como uma resposta adaptativa da planta para otimizar a absorção e utilização da água disponível.

O parênquima cortical é importante no transporte radial de água da epiderme para o cilindro vascular, ou seja, a água precisa passar por várias camadas de células corticais para chegar à endoderme (Lynch, 2018). Em espécies agrícolas monocotiledôneas que não possuem crescimento secundário, o córtex pode permanecer viável por longos períodos. O genótipo biótipo sequeiro BRS 404 e MGS Brilhante sob déficit hídrico sofreu uma redução na área do córtex da raiz e também a área da secção transversal da raiz e um aumento na área do cilindro vascular, isso está relacionado ao encurtamento do caminho radial através das células corticais, ajudando assim a melhorar a condutância radial para fluxo de água (Lynch, 2018). Em um estudo de linhas contrastantes de milho expostas ao estresse por déficit hídrico em ambientes controlados e no campo, o tecido do córtex reduzido e o tamanho das células corticais maiores, foram associados, enraizamento mais profundo, maior captação de água, melhor estado hídrico da planta e, portanto, maior crescimento e rendimento (Chimungu; Brown; Lynch, 2014), resultado semelhante foi encontrado também no trigo (Ouyang et al., 2020). No entanto os resultados observados para os outros genótipos do biótipo irrigado, suas respostas foram diferentes, a área do córtex da raiz não influenciou na seca e também área do cilindro vascular foi pequena em relação à área do córtex, esta correlação faz aumentar o caminho radial através das células corticais, fazendo diminuir a condutância radial para o fluxo de água.

Outro fator importante encontrado em nosso estudo é o aumento da espessura da epiderme e endoderme para o genótipo do biótipo sequeiro BRS 404, além de melhorar a fluxo radial de transporte de íons de modo simplasto e apoplasto como foi relatado anteriormente em sua anatomia, este genótipo também possui barreiras apoplásticas. A presença de uma endoderme espessa pode desempenhar um papel na prevenção do colapso da porção interna da raiz e na proteção dos tecidos do feixe vascular contra a desidratação (Mostajeran; Rahimi-Eic, 2008). Este resultado indica que a diferença varietal na espessura da parede celular da endoderme e epiderme pode determinar a tolerância à seca nesse cultivar de trigo BRS 404, porque o espessamento das paredes celulares pode impedir o vazamento de água das raízes que restringe o fluxo apoplástico radial de água no sentido inverso, isto é, do interior para o exterior

da raiz, uma condição fundamental para o estabelecimento de pressão positiva no xilema e também contra desidratação dos tecidos (Kadam et al., 2015). Porém o genótipo biótipo sequeiro MGS Brilhante recompensou aumentando a espessura da sua epiderme e a área do feixe vascular para restringir o fluxo apoplástico radial de água no sentido inverso, na qual a área do feixe vascular foi maior melhorando o fluxo da pressão positiva no vaso do xilema.

Um aumento da área do vaso do metaxilema, no número do vaso do protoxilema e diminuição da espessura do vaso do protoxilema nos genótipos do biótipo sequeiro BRS 404 e MGS Brilhante, estão correlacionados a maior absorção de água, devido as características anatômicas que ajudam a manter esses vasos com pressão positiva. Um estudo feito por Kadam et al., (2015), demonstrou que o do diâmetro do vaso do metaxilema no trigo pode ajudar a aumentar a absorção de água pelas raízes, e a condutividade axial perto das pontas das raízes em solo mais profundo facilita o uso eficaz da água. O aumento no número do protoxilema com diâmetros menores proporciona maior resistência mecânica aos tecidos vasculares, ajudando as plantas a lidar com as tensões associadas ao déficit hídrico, como a flutuação na disponibilidade de água no solo e a pressão da transpiração, os vasos menores também são menos propensos a embolia (Lynch; Chimungu; Brown, 2014).

O ângulo da raiz também é uma estratégia do genótipo biótipo sequeiro BRS 404, lidar com situações ao déficit hídrico. O ângulo estreito de crescimento das raízes promove um crescimento mais profundo das raízes e está frequentemente associado à melhoria do acesso à água e aos nutrientes em solos profundos durante a seca terminal (Alahmad et al., 2019). Assim, o sistema radicular de ângulo estreito é uma característica fenotípica útil para a seleção de genótipos tolerantes à seca e pode prevenir a redução do rendimento durante a seca (Pires et al., 2020).

Estas variações de resistência à seca como mostramos anteriormente, os genótipos do biótipo irrigado BRS 264, Tbio Aton, Tbio duque e ORS Feroz, não houve a mesma resposta frente ao déficit hídrico devido aos resultados que mostraram que não houve interações significativas na maioria das variáveis em estudo, evidenciando uma baixa resistência ao déficit hídrico.

A plasticidade fenotípica das características hidráulicas das raízes é fundamental para a sobrevivência das plantas em condições de déficit hídrico, já que a capacidade de tolerância ao déficit hídrico depende da adaptação da aclimatação ou plasticidade (Lens et al., 2022). Os resultados de plasticidade fenotípica dos genótipos biótipo sequeiro BRS 404 e MGS brilhante demonstraram parâmetros radiculares tolerantes à seca, demonstrado por suas características morfoanatômicas e maior plasticidade entre os genótipos em estudo.

As respostas das características anatômicas e da arquitetura do sistema radicular sob déficit hídrico nos genótipos biótipo sequeiro BRS 404 e MGS Brilhante, fornecem uma compreensão mecanicista adicional da plasticidade da raiz do trigo para a adaptação sob déficit hídrico, e que pode ser usado na seleção para o melhoramento genético em banco de germoplasma do trigo.

5 CONCLUSÕES

A avaliações anatômicas e da arquitetura do sistema radicular do trigo sob condições de déficit hídrico no solo a 30% de capacidade de campo proporcionou demonstrar que o genótipo biótipo sequeiro BRS 404, promoveu em uma resistência à seca através das características de TSA, MXVA, RCA, RET, REDT, RPD, Px number e o ângulo da raiz. Já o genótipo biótipo sequeiro MGS Brilhante, suas características que resultou em uma adaptação a resistência a seca foram a RCA, TSA, MXVA, RET, RPD e PX number. Sendo que esses genótipos também apresentaram resultados semelhantes no índice de plasticidade fenotípica para as características de MXVA, RCA e RPD.

Nosso estudo sugere que os genótipos BRS 404 e MGS Brilhante podem ser considerados mais resistentes ao déficit hídrico do que os genótipos do biótipo irrigado BRS 264, Tbio Duque, Tbio Aton e ORS Feroz.

Com base nos resultados, programas de melhoramento genético podem aproveitar estas informações ao selecionar genótipos de trigo tolerantes à seca.

REFERÊNCIAS

- Alahmad, S., el Hassouni, K., Bassi, F. M., Dinglasan, E., Youssef, C., Quarry, G., Aksoy, A., Mazzucotelli, E., Juhász, A., Able, J. A., Christopher, J., Voss-Fels, K. P., & Hickey, L. T. (2019). **A Major Root Architecture QTL Responding to Water Limitation in Durum Wheat.** *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00436>
- Battenfield SD, Guzmán C, Gaynor RC, Singh RP, Pena RJ, Dreisigacker S, Fritz AK, Poland JA (2016). **Genomic selection for processing and end-use quality traits in the CIMMYT spring bread wheat breeding program.** *The Plant Genome*, v. 9, n. 1, p. 1-12. <https://doi.org/10.3835/plantgenome2016.01.0005>.
- Ben Rejeb, K., Abdelly, C., & Saviouré, A. (2014). **How reactive oxygen species and proline face stress together.** *Plant Physiology and Biochemistry*, 80, 278–284. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.04.007>.
- Bhattacharya, A. (2021). **Effect of Soil Water Deficit on Growth and Development of plants: A Review.** *Soil Water Deficit Physiol. Issues Plants*, 2021, 393–488.
- Chimungu, J. G., Brown, K. M., & Lynch, J. P. (2014). **Large Root Cortical Cell Size Improves Drought Tolerance in Maize.** *Plant Physiology*, 166(4), 2166–2178. <https://doi.org/10.1104/pp.114.250449>
- Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). **Portal de Informações Agropecuárias.** 2022.
- Dolferus R, Ji X; Richards RA. (2011). **Abiotic stress and control of grain number in cereals.** *Plant Sci* 181: 331–341. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.05.015>.
- Feder N & O'Brien TP (1968). **Plant microtechnique: some principles and new methods.** *American Journal of Botany*, 55, (1), 123-142.
- Ferreira, D. F. (2011). **Sisvar: a computer statistical analysis system.** *Ciência e Agrotecnologia*, 35(6), 1039–1042. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>.
- Furbank, R.T.; Sharwood, R.; Estavillo, G.M.; Silva-Perez, V.; Condon, A.G. (2020). **Photons to food: Genetic improvement of cereal crop photosynthesis.** *J. Exp. Bot.*, 71, 2226–2238. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa077>.
- Hoagland, D. R.; Arnon, D. I. **The water culture method for growing plants without soil.** *Calif. Agr. Exp. STA. Cir*, 347p., 1950
- Johansen DA (1940). **Plant microtechnique.** McGraw-Hill Book Company, Inc: London, 530p.
- Kapoor, D.; Bhardwaj, S.; Landi, M.; Sharma, S.; Ramakrishnan, M.; Sharma, A. (2020). **The impact of drought in plant metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production.** *Appl. Sci.*, 10, 5692. <https://doi.org/10.3390/app10165692>
- Kadam, N. N., Yin, X., Bindraban, P. S., Struik, P. C., & Jagadish, K. S. V. (2015). **Does Morphological and Anatomical Plasticity during the Vegetative Stage Make Wheat**

More Tolerant of Water Deficit Stress Than Rice? *Plant Physiology*, 167(4), 1389–1401. <https://doi.org/10.1104/pp.114.253328>.

Leng, G.; Hall, J. (2019). **Crop yield sensitivity of global major agricultural countries to droughts and the projected changes in the future.** *Sci. Total Environ.*, 654, 811–821. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.434>.

Lens, F., Gleason, S. M., Bortolami, G., Brodersen, C., Delzon, S., & Jansen, S. (2022). **Functional xylem characteristics associated with drought-induced embolism in angiosperms.** *New Phytologist*, 236(6), 2019–2036. <https://doi.org/10.1111/nph.18447>.

Litoriya NS, Modi AR, Talati JG (2018). **Nutritional evaluation of durum wheat with respect to organic and chemical fertilizers.** *Agricultural Research*, v. 7, n. 2, p. 152-157. <https://doi.org/10.1007/s40003-018-0301-2>.

Lynch, J. P. (2018). **Rightsizing root phenotypes for drought resistance.** *Journal of Experimental Botany*, 69(13), 3279–3292. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery048>.

Lynch, J. P., Chimungu, J. G., & Brown, K. M. (2014). **Root anatomical phenes associated with water acquisition from drying soil: targets for crop improvement.** *Journal of Experimental Botany*, 65(21), 6155–6166. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru162>.

Lynch, J. P., Strock, C. F., Schneider, H. M., Sidhu, J. S., Ajmera, I., Galindo-Castañeda, T., Klein, S. P., & Hanlon, M. T. (2021). **Root anatomy and soil resource capture.** *Plant and Soil*, 466(1–2), 21–63. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05010-y>.

Marchiori, P. E. R., Machado, E. C., Sales, C. R. G., Espinoza-Núñez, E., Magalhães Filho, J. R., Souza, G. M., Pires, R. C. M., & Ribeiro, R. V. (2017). **Physiological Plasticity Is Important for Maintaining Sugarcane Growth under Water Deficit.** *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02148>.

Maurel, C., & Nacry, P. (2020). **Root architecture and hydraulics converge for acclimation to changing water availability.** *Nature Plants*, 6(7), 744–749. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-0684-5>.

Mostajeran, A., & Rahimi-Eic, V. (2008). **Drought Stress Effects on Root Anatomical Characteristics of Rice Cultivars (*Oryza sativa* L.).** *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 11(18), 2173–2183. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.2173.2183>.

Ouyang, W., Yin, X., Yang, J., & Struik, P. C. (2020). **Comparisons with wheat reveal root anatomical and histochemical constraints of rice under water-deficit stress.** *Plant and Soil*, 452(1–2), 547–568. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04581-6>

Pires, M. V., de Castro, E. M., de Freitas, B. S. M., Souza Lira, J. M., Magalhães, P. C., & Pereira, M. P. (2020). **Yield-related phenotypic traits of drought resistant maize genotypes.** *Environmental and Experimental Botany*, 171, 103962. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103962>.

Porter JR, Challinor AJ, Henriksen CB, Howden SM, Martre P, Smith P. (2019). **Invited review: intergovernmental panel on climate change, agriculture, and food—a case of**

shifting cultivation and history. *Glob Chang Biol* 25: 2518–2529.
<https://doi.org/10.1111/gcb.14700>.

Rocca Da Cunha, G., Caierão, E., & Técnicos, E. (n.d.). **TRIGO E TRITICALE**
Informações Técnicas para 15a Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e
Triticale. <https://www.embrapa.br/fale-conosco>

Silva, E. A. (2017). **A cultura do trigo em Minas Gerais.** In: OLIVEIRA NETO, A. A.;
SANTOS, C.M. R. (Orgs.). *A cultura do trigo*. Brasília: Conab, p. 57-62.

Tumová, L.; Tarkowská, D.; Řeřová, K.; Marková, H.; Kořcová, M.; Rothová, O.; Čeřetka,
P.; Holá, D. (2018). **Drought-Tolerant and Drought-Sensitive Genotypes of Maize (*Zea***
mays L.) Differ in Contents of Endogenous Brassinosteroids and Their Drought-Induced
Changes. *PLoS ONE*, 13, e0197870. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197870>

Valladares, F., Sanchez-Gomez, D., & Zavala, M. A. (2006). **Quantitative estimation of**
phenotypic plasticity: bridging the gap between the evolutionary concept and its
ecological applications. *Journal of Ecology*, 94(6), 1103–1116.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01176.x>.

York, L. M. (2018). **Phenotyping Crop Root Crowns: General Guidance and Specific**
Protocols for Maize, Wheat, and Soybean. *Methods Mol Biol.*, (pp. 23–32).
https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7747-5_2

Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). **A decimal code for the growth stages**
of cereals. *Weed Research*, 14(6), 415–421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>.