



FRANCIENE APARECIDA BARRA LOPES

**CAFEEIROS POTENCIALMENTE TOLERANTES AO
DÉFICIT HÍDRICO NA FASE DE FORMAÇÃO DA LAVOURA**

**LAVRAS – MG
2024**

FRANCIENE APARECIDA BARRA LOPES

**CAFEIROS POTENCIALMENTE TOLERANTES AO DÉFICIT HÍDRICO NA
FASE DE FORMAÇÃO DA LAVOURA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Dr. Cesar Elias Botelho
Orientador

Dr. Denis Henrique Silva Nadaleti
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).

Lopes, Franciene Aparecida Barra.

Cafeeiros potencialmente tolerantes ao déficit hídrico na fase
de formação da lavoura / Franciene Aparecida Barra Lopes. - 2024.
85 p. : il.

Orientador(a): Cesar Elias Botelho.

Coorientador(a): Denis Henrique Silva Nadaleti.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Coffea arabica L. 2. Estresses abióticos. 3. Expressão gênica.
I. Botelho, Cesar Elias. II. Nadaleti, Denis Henrique Silva. III.
Título.

FRANCIENE APARECIDA BARRA LOPES

**CAFEEIROS POTENCIALMENTE TOLERANTES AO DÉFICIT HÍDRICO NA
FASE DE FORMAÇÃO DA LAVOURA**

**COFFEE TREES POTENTIALLY TOLERANT TO WATER DEFICIT IN THE
CROP FORMATION PHASE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 19 de julho de 2024.

Dra. Milene Alves de Figueiredo Carvalho EMBRAPA

Prof. Dr. Evaristo Mauro de Castro UFLA

Dr. Cesar Elias Botelho
Orientador

Dr. Denis Henrique Silva Nadaleti
Coorientador

**LAVRAS – MG
2024**

Aos meus pais, *Rosa Barra e Raimundo Lopes*, por sempre me apoiarem, e ensinar a não desistir dos sonhos, vocês são meus exemplos de perseverança, honestidade e fé.
Ao meu querido namorado, *Gustavo Vieira*, agradeço pelo seu amor, dedicação e companheirismo.
Ao meu irmão, *Francisney Barra Lopes*, pelo carinho e apoio.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À *Deus*, primeiramente, presença constante em minha vida, que me deu força e capacidade de resiliência em todos os instantes. À *Nossa Senhora Aparecida*, por me ouvir e abençoar todos os dias.

Aos meus pais, agradeço imensamente por todos os esforços. À vocês, todo o meu amor.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), particularmente ao Programa de Pós Graduação em Agronomia/Fitotecnia, pela oportunidade de realizar o mestrado. Aos professores do Setor de Cafeicultura, Rubens Guimarães, Dalysse Castanheira e Tiago Teruel, pelos ensinamentos.

Ao meu orientador, Pesq. Dr. Cesar Elias Botelho, pela confiança, atenção, paciência e por repassar seus conhecimentos que tanto contribuíram para minha formação profissional.

Ao coorientador, Pesq. Dr. Denis H. S. Nadaleti, pela dedicação, atenção e por todo suporte necessário para conclusão desta etapa.

A Dra. Cyntia S. dos Santos, agradeço por compartilhar seus conhecimentos relacionadas à linha de pesquisa, por estar presente e me ajudar em todas as etapas do projeto. Sou grata pela sua dedicação, generosidade e comprometimento.

Aos meus colegas e bolsistas João Pedro Bernardes, Antônio Rezende, Elísio Horbylon, Bernardo Siqueira, Tamara e Carlos Eduardo Reis, por colaborarem com as avaliações dos experimentos. Vocês foram fundamentais para execução deste projeto.

À Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais EPAMIG Sul e Oeste. Estendo meus agradecimentos aos funcionários, Valter, Hércio (Sacola), Jaime e Dr. Cleidson por me ajudarem na condução dos experimentos.

Ao Laboratório de Anatomia Vegetal e Fisiologia do Cafeeiro do Setor de Cafeicultura, especialmente Dra. Ana Cristina (Tina) e Dra. Daiane Soares, pela convivência e por todo auxílio nas análises anatômicas.

Ao Laboratório de Genética Molecular do Setor de Cafeicultura, Pesq. Dr. Alan Andrade pela parceria e em especialmente, Dra. Fernanda de Araújo Carneiro, por ajudar na orientação e condução das análises moleculares.

A todos meus colegas de curso, obrigada pelo incentivo e amizade.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e também com apoio das instituições, Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG),

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia do Café (INCT – Café) e do Consórcio Pesquisa Café.

A todos que contribuíram para a realização desta dissertação, seja de forma direta ou indiretamente, deixo registrado aqui, sou grata pela sua generosidade e pelo seu tempo. **Meus sinceros agradecimentos.**

RESUMO

O objetivo deste estudo foi selecionar cafeeiros potencialmente tolerantes ao déficit hídrico na fase de formação da lavoura. Um grupo de 17 genótipos (16 cultivares e 1 progênie) foi avaliado em condições naturais, no Campo Experimental da Epamig Oeste, Patrocínio - MG, utilizando 24 características fisiológicas, anatômicas e de crescimento, bem como a expressão gênica diferencial de aquaporinas e genes candidatos relacionados à seca (Gs). Foram realizados dois experimentos com os genótipos de café arábica, um em condição de sequeiro e outro irrigado por gotejamento durante o período seco. Ambos os experimentos foram em delineamento em blocos casualizados (DBC), com 17 genótipos, cada um com quatro repetições. A parcela experimental foi composta por oito plantas, sendo a parcela útil para as avaliações, as três plantas centrais. As avaliações foram realizadas após cinco meses do plantio das mudas no campo. O período experimental foi de 75 dias, com três avaliações em campo. Após a caracterização agrônômica e fisiológica dos 17 genótipos, foi realizada a pré-seleção de nove genótipos para caracterização anatômica, e posteriormente foram pré-selecionados cinco genótipos para avaliar a expressão gênica diferencial por meio da qPCR. Foram realizadas análises multivariadas a fim de distinguir os genótipos e as variáveis relevantes. Houve diferença entre o desempenho dos genótipos avaliados. Em suma, os genótipos com maior potencial de tolerância ao déficit hídrico foram MGS Ametista, MGS Aranãs, MGS Paraíso 2, IAC 125 RN, IAC Catuaí SH3 e Acauã Novo, que apresentaram maior manutenção do potencial hídrico associado à uma boa eficiência hídrica, impactando positivamente nas trocas gasosas e no crescimento inicial durante o déficit hídrico em condições de campo. Os genótipos IAC Catuaí SH3 e MGS Paraíso 2 mostraram respostas moleculares eficientes no transporte de água e na conservação do potencial hídrico durante o período seco. Os genes *PIP 1:3*, *CaGolS3* e *CaDHNI*, exibiram maior expressão gênica relativa sob déficit hídrico em genótipos de *Coffea arabica*.

Palavras-chaves: *Coffea arabica* L.; estresses abióticos; expressão gênica; melhoramento genético.

ABSTRACT

The aim of this study was to select coffee trees that are potentially tolerant to water deficit during the crop formation phase. A group of 17 genotypes (16 cultivars and 1 progeny) was evaluated under natural conditions at the Epamig Oeste Experimental Field, Patrocínio - MG, using 24 physiological, anatomical and growth characteristics, as well as differential gene expression of aquaporins and candidate drought-related genes (Gs). Two experiments were carried out with the arabica coffee genotypes, one under rainfed conditions and the other under drip irrigation during the dry season. Both experiments were in a randomized block design with 17 genotypes, each with four replications. The experimental plot consisted of eight plants, with the three central plants being the useful plot for the evaluations. The evaluations were carried out five months after the seedlings were planted in the field. The experimental period was 75 days, with three evaluations in the field. After the agronomic and physiological characterization of the 17 genotypes, nine genotypes were pre-selected for anatomical characterization, and then five genotypes were pre-selected to evaluate differential gene expression using qPCR. Multivariate analyses were carried out to distinguish between the genotypes and the relevant variables. There was a difference between the performance of the genotypes evaluated. In short, the genotypes with the greatest potential for tolerance to water deficit were MGS Ametista, MGS Aranãs, MGS Paraíso 2, IAC 125 RN, IAC Catuaí SH3 and Acauã Novo, which showed greater maintenance of water potential associated with good water efficiency, positively impacting gas exchange and initial growth during water deficit in field conditions. The IAC Catuaí SH3 and MGS Paraíso 2 genotypes showed efficient molecular responses in water transport and water potential conservation during the dry season. The *PIP 1:3* genes, *CaGols3* and *CaDHN1*, showed greater relative gene expression under water deficit in *Coffea arabica* genotypes.

Keywords: *Coffea arabica* L.; abiotic stresses; gene expression; genetic improvement.

INDICADORES DE IMPACTO

O estudo visou identificar cultivares de *Coffea arabica L.*, já lançadas pelos programas de melhoramento genético do cafeeiro, com maior potencial de tolerância à deficiência hídrica, além de caracterizar as características das plantas correlacionadas com essa adaptação. A difusão do estudo será feita por meio de produção de artigos científicos; boletins técnicos e participações em congressos, simpósios e dias de campo voltados para a cafeicultura com presença de empresas, profissionais da área e produtores. Dentre os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), o estudo pode ser medido pela contribuição dessas pesquisas para alcançar os objetivos 2 e 13, fornecendo dados e conhecimentos que impulsionam a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis e resilientes às mudanças climáticas, ao mesmo tempo em que promovem o desenvolvimento econômico e social das comunidades envolvidas na produção de café.

IMPACT INDICATORS

The study aimed to identify *Coffea arabica L.* cultivars, already launched by coffee genetic improvement programs, with greater potential for tolerance to water deficiency, as well as to characterize the plant characteristics correlated with this adaptation. The study will be disseminated through the production of scientific articles, technical bulletins and participation in congresses, symposiums and field days focused on coffee growing, attended by companies, professionals in the field and producers. Among the 17 Sustainable Development Goals (SDGs) of the United Nations (UN), the study can be measured by the contribution of this research to achieving goals 2 and 13, providing data and knowledge that drive the adoption of more sustainable agricultural practices that are resilient to climate change, while promoting the economic and social development of the communities involved in coffee production.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Representação gráfica das variáveis climatológicas registradas mensalmente, no ano de 2023, no município de Patrocínio, Minas Gerais.....27
- Figura 2** – Projeção de vetores e dispersão das cultivares de *Coffea arabica* L., em relação aos dois primeiros componentes principais em ambiente irrigado.57
- Figura 3** – Projeção de vetores e dispersão das cultivares de *Coffea arabica* L., em relação aos dois primeiros componentes principais em ambiente sequeiro após a imposição do déficit hídrico.....59
- Figura 4** – Heat map representando valores médios de expressão diferencial de genes alvo em cinco cultivares de *Coffea arabica* L., aos 60 dias de estresse hídrico em condições de campo.62
- Figura 5** – Expressão de genes diferencialmente expressos em folha de cultivares de *C. arabica* em campo sob duas condições hídricas durante período seco na região do Cerrado Mineiro. 64
- Figura 6** – Gráfico de dispersão das cultivares de *Coffea arabica* em relação as características fisiológicas e de expressão gênica de diferentes genes em duas condições hídricas após a imposição do déficit hídrico (A) Irrigado (B) Sequeiro.70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação dos genótipos utilizados nos dois experimentos e suas instituições de origem (continua).	28
Tabela 2 – Valores médios de incremento na altura (IALT) e diâmetro de caule (IDC) em genótipos de cafeeiro submetidos a dois tratamentos hídricos.....	36
Tabela 3 – Valores médios de incremento na altura (IALT - cm), diâmetro de caule (IDC - cm) e número de ramos plagiotrópicos (INRP) em genótipos de cafeeiro submetidos a dois tratamentos hídricos (continua).	36
Tabela 4 – Taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (gs), taxa transpiratória (E) déficit de pressão de vapor (DPV), temperatura foliar (Tleaf), eficiência do uso da água (EUA – A/E) e potencial hídrico foliar na antemanhã (MPa) avaliados em cafeeiro arábica ao início do período seco.	40
Tabela 5 – Taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (gs), taxa transpiratória (E), déficit de pressão de vapor (DPV), temperatura foliar (Tleaf), eficiência do uso da água (EUA – A/E) e potencial hídrico foliar na antemanhã (MPa) avaliados em cafeeiro arábica aos 60 dias de suspensão da irrigação em dois tratamentos hídricos I – irrigado e S – sequeiro.....	41
Tabela 6 – Temperatura foliar (Tleaf) avaliada em cafeeiro arábica aos 60 dias de período seco submetido a dois tratamentos hídricos, no período seco.	44
Tabela 7 – Condutância estomática (gs), taxa transpiratória (E), eficiência do uso da água (EUA – A/E) , déficit de pressão de vapor (DPV) e temperatura foliar (Tleaf) avaliados em cafeeiro arábica dois dias após o retorno da irrigação.....	44
Tabela 8 – Taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (gs), taxa transpiratória (E), déficit de pressão de vapor (DPV), temperatura foliar (Tleaf), eficiência do uso da água (EUA – A/E) e potencial hídrico foliar na antemanhã (MPa) avaliados em cafeeiro arábica após o retorno da irrigação. I- irrigado. S – sequeiro.....	46
Tabela 9 – Valores médios da espessura da cutícula da face adaxial (CUT - μm) e de limbo foliar (LIM - μm), avaliados em genótipos de <i>Coffea arabica</i> L. após a imposição do déficit hídrico.....	48
Tabela 10 – Valores médios da espessura da epiderme abaxial (EAB – μm) avaliados em genótipos de <i>Coffea arabica</i> L., após o período seco.....	49
Tabela 11 – Valores médios da espessura da epiderme da face adaxial (EAD - μm); espessura do parênquima paliçádico (EPP - μm); espessura do parênquima lacunoso (EPL - μm); e	

espessura da epiderme da face abaxial, (EAB - μm); avaliados em genótipos de <i>Coffea arabica</i> L., após o período seco.	50
Tabela 12 – Valores médios de área do floema e xilema (AF, AX – μm^2), frequência de vasos do xilema (FVX – vasos/ mm^2), índice de vulnerabilidade (IV), diâmetro (DVX - μm), e condutividade hidráulica relativa ($\text{CHR} = r^4 \cdot \text{FVX}$, $\mu\text{m}^4 \cdot 10^6$) avaliados em genótipos de <i>Coffea arabica</i> L. em dois ambientes hídricos (I) irrigado e (S) sequeiro, durante o período seco.	52
Tabela 13 – Valores médios de densidade estomática (DEN - número de estômatos mm^2) e relação entre diâmetro polar e equatorial de estômatos (DPDE) avaliados em genótipos de <i>Coffea arabica</i> L, após o período seco.	54
Tabela 14 – Correlação das variáveis fisiológicas, anatômicas e agronômicas, com as duas primeiras componentes principais de cultivares de <i>Coffea arabica</i> L. em sistema cultivo de sequeiro e irrigado após a imposição do déficit hídrico.	56
Tabela 15 – Correlação das variáveis fisiológicas e expressão gênica de GCs em cultivares de <i>Coffea arabica</i> em duas condições hídricas durante o período seco.	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Classificação e diversidade genética do café arábica	18
2.2	Agronegócio café.....	19
2.2.1	Desafios climáticos para o café arábica	20
2.2.2	Estratégias de adaptação das plantas ao déficit hídrico	21
2.3	Expressão gênica em qPCR e respostas moleculares em café arábica sob deficiência hídrica.....	24
3	MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1	Localização e caracterização da área experimental	27
3.2	Descrição dos experimentos.....	28
3.2.1	Material vegetal, formação de mudas, implantação dos experimentos e tratos culturais.....	28
3.2.2	Delineamento experimental	30
3.2.3	Avaliações fisiológicas	30
3.2.4	Avaliações morfológicas	31
3.2.5	Avaliações anatômicas.....	31
3.2.6	Avaliações moleculares	32
3.3	Análises estatísticas.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	Crescimento de cafeeiros arábica durante o déficit hídrico	36
4.2	Potencial hídrico e trocas gasosas	39
4.2.1	Caracterização anatômica de cafeeiros arábica sob condições irrigada e de sequeiro durante o período seco.....	47
4.2.2	Dispersão das cultivares avaliadas e correlação entre as características fisiológicas, anatômicas e morfológicas.	56
4.2.2.1	Perfil diferencial da expressão gênica em <i>Coffea arabica</i> sob déficit hídrico.	61
4.2.2.2	Dispersão das cultivares avaliadas e correlação entre características fisiológicas e expressão de GCs em <i>Coffea arabica</i> sob déficit hídrico.....	69
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
6	CONCLUSÕES.....	73
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICES	86

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil é o maior produtor de café do mundo, com uma produção esperada de cerca de 58,08 milhões de sacas de 60 kg para o ano de mercado 2024/2025 (Brazilian Farmers, 2024). A produção no Brasil está distribuída nos estados de Minas Gerais sendo o maior produtor, seguido por Espírito Santo, São Paulo, Bahia e Rondônia que contribuem com a produção nacional com variações de espécies *Coffea arabica* L. (arábica) e *Coffea canephora* Pierre (robusta e conilon) (BSCA, 2023).

A cafeicultura, nos últimos anos, tem enfrentado desafios climáticos consideráveis, como períodos de estiagens prolongadas e o aumento das temperaturas, como nos anos de 2014 e 2020 (Martins *et al.*, 2015; CNA, 2020).

Diante do cenário de mudanças climáticas, os programas de melhoramento genético do cafeeiro arábica têm intensificado seus esforços na obtenção de genótipos tolerantes ao déficit hídrico por meio de cruzamentos entre materiais genéticos tolerantes e produtivos. Entre as cultivares já registradas que possuem boa tolerância aos efeitos da deficiência hídrica estão a Acauã Novo (Santinato *et al.*, 2018), Siriema ACS 1 (Dias *et al.*, 2007), IAC Catuaí SH3 (Fazuoli *et al.*, 2019), IPR 103 (Sera *et al.*, 2013) e clones de canéfora (Ferrão *et al.*, 2000). No entanto, ainda é fundamental realizar pesquisas adicionais para caracterizar genótipos sob diferentes níveis de estresses abióticos, em diferentes locais e selecionar aqueles com tolerância e outras características desejáveis, a fim de atender às necessidades dos produtores frente aos desafios das mudanças climáticas.

Nesse sentido, as pesquisas têm avançado substancialmente com foco na identificação de genótipos que exibem maior potencial de tolerância ao déficit hídrico e altas temperaturas. Esses genótipos são avaliados quanto às suas características morfofisiológicas e anatômicas (Coelho *et al.*, 2022; Queiroz-Voltan *et al.*, 2014, Reis *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2022a), bem como suas respostas moleculares e bioquímicas ao déficit hídrico (Marraccini *et al.*, 2020, Santos *et al.*, 2021b). Além disso, tecnologias que ajudam a mitigar o efeito do estresse hídrico, como aplicação de fotoprotetores (Roda *et al.*, 2023) e técnicas de irrigação (Martins *et al.*, 2007a), tem sido exploradas.

Avaliações morfoanatomofisiológicas são essenciais para compreender as respostas das plantas ao déficit hídrico. Essas avaliações podem resultar no aprimoramento de técnicas de melhoramento genético, e contribuir para a caracterização de genótipos mais tolerantes à seca, que possam ser introduzidos em diferentes regiões do país para lidarem com períodos

prolongados de seca, na tentativa de garantir a produtividade nacional, e por conseguinte, mundial (Camargo, 2010).

O programa de melhoramento genético da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) dentre as diversas linhas de pesquisas, busca caracterizar e identificar cultivares e progênies elites com potencial de tolerância ao déficit hídrico, ao longo das fases fenológicas da cultura. Avaliar o desempenho das cultivares já registradas, assim como das progênies em fase final de seleção pelos programas de melhoramento do cafeeiro, é um processo vantajoso, quando comparado a inicialização de um novo programa para desenvolver novas cultivares promissoras à limitação hídrica.

Além disso, por se tratar de uma cultura perene, é importante avaliar o cafeeiro em diferentes fases fenológicas. Neste estudo, foi enfatizada a caracterização e identificação dos genótipos de café arábica com potencial de tolerância ao déficit hídrico durante a fase inicial da lavoura, logo após o plantio no campo. Nesta fase, os cafeeiros jovens, cujos sistemas radiculares ainda não estão plenamente desenvolvidos para uma absorção eficiente de água, são mais suscetíveis a eventos climáticos, como má distribuição de chuvas e veranicos (DaMatta; Ramalho, 2006).

Identificar genótipos mais tolerantes nesta fase da cultura é crucial para assegurar um melhor estabelecimento das mudas no campo, promovendo melhor crescimento e desenvolvimento até a primeira produção. Isso reduz a necessidade de replantio de mudas, minimiza falhas e contribui para obtenção de lavouras mais uniformes, facilitando os tratamentos culturais. Ademais, genótipos mais resilientes aos ciclos de déficit hídrico contribuem para sustentabilidade ambiental e redução da vulnerabilidade econômica dos produtores.

Pelo exposto, o objetivo deste estudo foi selecionar cafeeiros potencialmente tolerantes ao déficit hídrico na fase de formação da lavoura, por meio de características fisiológicas, anatômicas, respostas moleculares e de crescimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Classificação e diversidade genética do café arábica

O cafeeiro é uma planta perene, pertencente à família Rubiaceae e ao gênero *Coffea*, que abrange mais de 100 espécies. O comércio mundial de café é suportado, principalmente, por duas espécies, café arábica (*Coffea arabica* L.) e o café canéfora (*Coffea canephora* Pierre ex. A. Froehner). Na safra 2023-2024, a produção global de café alcançou aproximadamente 171,4 milhões de sacas de 60kg. Deste total, a espécie *Coffea arabica* (café arábica) contribuiu com 97,3 milhões de sacas, representando 56,7% da produção, enquanto *Coffea canephora* (robusta+conilon) contribuiu com 74,1 milhões de sacas, equivalente a 43,3% do volume total mundial (Ferreira, 2024b)

A espécie *C. arabica*, foco do nosso trabalho, originária da Etiópia, planta de clima tropical úmido, com temperaturas médias anuais em torno de 18 a 23° C, encontra no Brasil diversas áreas adequadas a seu cultivo, com destaque para o Sul de Minas Gerais e Matas de Minas. Além disso, técnicas de irrigação permitem seu cultivo em regiões consideradas marginais, como o Cerrado Mineiro e o Oeste Baiano. É uma planta autógama, o que significa que a sua reprodução ocorre principalmente por meio de autofecundação, e alotetraplóide, com 44 cromossomos ($2n = 4x = 44$), composta por dois subgenomas diploídes distintos. Sua origem decorre do cruzamento entre duas espécies diploídes do mesmo gênero, ou seja, *C. canephora* (masculino) e *C. eugenioides* (feminina), ambas autoestéreis (Lashermes *et al.*, 2009).

O café arábica apresenta duas variedades genéticas amplamente reconhecidas, que se disseminaram globalmente: a variedade Typica e a variedade Bourbon, fonte das quais resultaram as cultivares tradicionais Mundo Novo e Catuaí, reconhecidas por produzir bebidas de qualidade e alto rendimento, porém, são altamente suscetíveis às principais pragas e doenças do cafeeiro (Van der Vossen *et al.*, 2015).

A diversidade genética do *C. arabica* é tradicionalmente conhecida como limitada em comparação a diversidade observada em *C. canephora*. Até o momento, o café canéfora tem sido a principal fonte de características de resistência à doenças e pragas que não são encontradas no café arábica, tais como a ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) e nematoides das galhas (*Meloidogyne spp.*) (Lashermes *et al.*, 2009). As espécies *Coffea racemosa* e *Coffea liberica* também têm contribuído nos programas de melhoramento de café arábica, devido à sua diversidade genética e características valiosas, como tolerância à estresses ambientais e

resistência à doenças (Tapaça *et al.*, 2023). Essas espécies são utilizadas em programas de hibridização para introduzir características agronômicas desejáveis, como tolerância à seca e resistência à pragas e doenças, às principais cultivares de café (Davis *et al.*, 2021).

Nos últimos anos, a cafeicultura vem apresentando avanços genéticos significativos, com genótipos superiores adaptados à diversas condições de cultivo, uma estratégia importante do melhoramento genético (Rodrigues *et al.*, 2015a), na tentativa de reduzir a vulnerabilidade do cafeeiro às consideráveis variações de temperatura, disponibilidade de água e aumento de incidência de pragas e doenças (Bilen *et al.*, 2023).

Os programas de melhoramento de *Coffea arabica* L., têm avançado substancialmente na seleção de características que promovam melhor resistência à pragas e doenças, produtividade e tolerância aos estresses abióticos. Por ser uma espécie autógama, as estratégias de melhoramento focam no desenvolvimento de cultivares homozigotas, resultando em lavouras uniformes propagadas por sementes. Os métodos de melhoramento mais empregados para essa espécie incluem seleção e hibridização dentro da mesma espécie, desenvolvimento de cultivares melhoradas com maior adaptabilidade, melhoramento de germoplasma e também o cruzamento de linhagens parentais selecionadas para certas características desejáveis para o desenvolvimento de cultivares híbridas (Alkimim *et al.*, 2017).

Além disso, a integração de métodos convencionais de melhoramento com técnicas biotecnológicas, incluindo o uso de marcadores moleculares, expressão gênica e cultura de tecidos, tem impulsionado os avanços genéticos do café arábica no desenvolvimento de novas cultivares que atendam às demandas do mercado e superem os desafios enfrentados pela cafeicultura. Essa abordagem tem sido especialmente eficaz para acelerar o processo de melhoramento, uma vez que, os métodos tradicionais são conhecidos por demandarem tempo considerável, até o registro de uma cultivar.

2.2 Agronegócio café

O agronegócio do café desempenha um papel crucial na economia de vários países, especialmente aquelas localizadas na região intertropical. Além disso, o café possui uma história culturalmente rica, influenciando não apenas a economia global, mas também deixando sua marca nas paisagens e nas comunidades em todo o mundo (Medeiros; Rodrigues, 2017).

Silva *et al.* (2023b) destacaram que Brasil, Vietnã, Colômbia e Indonésia estão consistentemente classificados entre os maiores produtores de café do mundo.

O Brasil se destaca mundialmente com o café, sendo o maior produtor e exportador. De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), a produção brasileira de café atingiu 55,1 milhões de sacas beneficiadas em 2023, representando um crescimento de 8,2% em relação ao ciclo de 2022 (CONAB, 2023).

O estado de Minas Gerais é o maior produtor de café arábica, obtendo uma produção de vinte e quatro milhões de sacas no ano de 2022 (CONAB, 2022). Dentro do território estadual, podemos destacar as mesorregiões Sul/Sudoeste e Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba.

Na Região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, conhecida como Cerrado Mineiro, o cultivo do café tornou-se possível a partir de 1972, através de políticas de modernização da cafeicultura, aprimoramento de tecnologias, e manejo que permitiram a correção da acidez do solo nessa região (Carvalho *et al.*, 2021c). A grande maioria dos municípios da região se desenvolveu e ainda se desenvolve graças à produção agropecuária. Inclusive, alguns dos municípios mais desenvolvidos, como Araguari, Monte Carmelo e Patrocínio, têm suas economias alavancadas pela cafeicultura empresarial.

Nesse contexto, esta região foi amplamente favorecida devido à baixa incidência de geadas, topografia mais plana facilitando a mecanização. O clima é caracterizado por uma temperatura média entre 18 °C e 22 °C, altitude entre 850 e 1.250 metros, período seco entre os meses de junho a setembro, com baixa incidência de chuvas, com um índice pluviométrico anual em torno de 1.600 mm (Ortega; Jesus, 2012).

No entanto, com eventos climáticos cada vez mais frequentes, o cenário tem sido cada vez mais desafiador, tanto para cafeicultura empresarial, quanto para os pequenos produtores, principalmente, pelos períodos de estiagens prolongados e déficit hídrico acentuado. Para lidar com as adversidades climáticas e minimizar oscilações de safras e preços, produtores de várias regiões têm cada vez mais buscado por cultivares tolerantes à seca e altas temperaturas.

2.2.1 Desafios climáticos para o café arábica

Os impactos das mudanças climáticas na agricultura global são preocupantes, e o café emerge como uma das culturas mais afetadas. A flutuação anual na produção de café está diretamente ligada, principalmente, à temperatura e à disponibilidade de água (Ramalho *et al.*, 2014).

As projeções do aumento das temperaturas médias globais feitas pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), podem favorecer o aumento da

evaporação, períodos mais longos de estiagens e redução da disponibilidade de água no solo para as plantas, impactando negativamente a produção mundial (IPCC, 2022).

O cafeeiro é uma planta sensível à variação de temperatura e a carência hídrica. As condições de cultivo para o café arábica são temperaturas entre 18 e 23 °C e precipitação anual entre 1.000 e 2.700 mm e um período de seca de um a três meses por ano (Clifford; Wilson 1985, Davis *et al.*, 2006; Ovalle-Rivera *et al.*, 2015; Wakjira, 2006).

O Brasil, como o maior produtor mundial de café arábica, enfrenta desafios significativos devido às mudanças climáticas. Regiões tradicionalmente propícias ao cultivo do café podem se tornar menos propícias devido ao aumento da temperatura e à redução da disponibilidade de água. Pesquisas como a de Ovalle-Rivera *et al.* (2015) destacam que áreas produtoras de café no Brasil, como o Cerrado e a região Sul, estão sujeitas a um aumento na frequência e na intensidade de eventos climáticos extremos, como secas, má distribuição de chuvas e ondas de calor, afetando negativamente a produção.

Diante desses desafios, os produtores de café no Brasil e em todo o mundo têm buscado adaptações e medidas de mitigação para enfrentar os impactos das mudanças climáticas. O desenvolvimento de cultivares de café mais tolerantes ao calor e à seca, tem sido defendido como uma das alternativas mais sustentáveis de aumentar a resiliência do setor cafeeiro (Davis *et al.*, 2021).

Nesse contexto, as instituições de pesquisa de melhoramento genético do cafeeiro, como o Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-Paraná) (antigo Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR), Instituto Agrônômico de Campinas (IAC), Empresa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), Fundação Procafé dentre outras instituições, têm desenvolvido trabalhos, a fim de identificar e selecionar genótipos com potencial para a tolerância à seca.

2.2.2 Estratégias de adaptação das plantas ao déficit hídrico

Em condições de restrição hídrica, as plantas desenvolvem diversas estratégias para mitigar o estresse, resultando em modificações morfológicas, anatômicas, fisiológicas e bioquímicas (Kappor *et al.*, 2020).

A tolerância hídrica é o mecanismo pelo qual as plantas conseguem sobreviver em condições de baixa disponibilidade hídrica, mantendo suas funções vitais em níveis reduzidos.

Para isso, empregam uma variedade de mecanismos morfológicos, fisiológicos e bioquímicos (Ghatak *et al.* 2017).

Em períodos que o déficit ocorre associado com altas temperatura, essa combinação pode ser mais danosa ao cafeeiro. As respostas às variações hídricas são mais pronunciadas em *C. arabica*, pois é considerada mais sensível ao estresse hídrico em comparação com *C. canephora* (DaMatta; Ramalho, 2006).

Independentemente da intensidade da restrição hídrica, observa-se uma redução no crescimento e desenvolvimento das plantas, perda da turgescência, clorose, redução dos ramos ortotrópicos, escaldaduras, senescência foliar, perdas na produção e na qualidade da bebida (Craparo, 2015; Rodrigues, 2015a)

Quanto à morfologia, as plantas de café arábica apresentam mudanças morfológicas significativas em condições de déficit hídrico, conforme destacado em vários estudos. Pesquisas demonstraram que, sob déficit hídrico, as plantas podem sofrer reduções na área foliar, na produção de biomassa vegetativa e no número de ramos plagiotrópicos (Santos; Carlesso, 1998).

As maiores perdas são evidenciadas em cafezais recém-plantados, nos quais as plantas enfrentam maiores desafios devido aos seus sistemas radiculares ainda não estarem completamente estabelecidos para captar e absorver água. Estudos indicam que as plantas de café arábica, especialmente aquelas de menor porte e com sistemas radiculares reduzidos, são mais suscetíveis ao déficit hídrico, alcançando níveis mais baixos de potencial hídrico com maior facilidade (Dominghetti *et al.*, 2016)

Com o aumento da severidade do déficit hídrico, a fotossíntese é limitada devido ao fechamento dos estômatos, resultando na redução das atividades fisiológicas das plantas, como a assimilação de dióxido de carbono (CO₂) durante a fotossíntese. A condutância estomática (gs) diminui de forma curvilínea à medida que o potencial hídrico (Ψ_w) da folha diminui, o que desencadeia o fechamento dos estômatos (DaMatta; Ramalho, 2006).

Elevadas temperaturas, déficit hídrico e alta luminosidade podem saturar o sistema fotossintético, levando à fotoinibição. Embora a fotossíntese no dossel do cafeeiro possa atingir a saturação a uma irradiância de 600 – 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, algumas folhas podem estar mais expostas à luz, enquanto outras, localizadas na parte interna da copa do café, permanecem mais sombreadas. A elevada irradiância, acompanhada de níveis de energia mais altos, resultará em uma maior produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), que têm o potencial de aumentar

o estresse oxidativo, prejudicar a fisiologia da planta e, por conseguinte, seu desempenho agrônomico (DaMatta *et al.*, 2016).

No entanto, plantas submetidas à seca se adaptam regulando a disponibilidade de água nos tecidos por meio do ajuste osmótico ou do aumento da elasticidade da parede celular, ou ambos, melhorando assim a manutenção do turgor. O ajuste osmótico permite que o potencial hídrico da folha (Ψ_w) diminua sem afetar o turgor foliar, através do acúmulo de solutos compatíveis no citoplasma, resultando em um potencial osmótico mais negativo, que estimula a absorção de água pelas raízes (Taiz; Zeiger, 2017).

Outra estratégia observada em plantas de *Coffea arabica* L. está relacionada à eficiência hidráulica, um aspecto crucial influenciado por diversos fatores. Estudos indicam que as plantas de café apresentam uma considerável variabilidade nas suas propriedades hidráulicas, com populações de café silvestre em diferentes ambientes demonstrando diferentes níveis de condutância hidráulica. Além disso, a interação entre as trocas gasosas e a eficiência hidráulica da planta desempenha um papel fundamental na manutenção do equilíbrio hídrico da planta, especialmente em condições moderadas de déficit hídrico (Ronchi *et al.*, 2015)

A eficiência na economia de água das plantas também está fortemente ligada à atividade das aquaporinas, proteínas intrínsecas da membrana que facilitam o transporte de água e outros solutos pequenos, como o CO_2 , através das membranas celulares (Li; Santoni; Maurel, 2014). Além disso, pesquisas mostraram que certas aquaporinas, como as da família PIP (Proteína Intrínseca de Membrana), estão envolvidas na regulação da condutância hidráulica em raízes e folhas de café durante condições de déficit hídrico (Martins *et al.*, 2019c).

Em resposta à escassez de água, alterações anatômicas estruturais têm sido observadas e extensivamente estudadas, revelando mudanças significativas na anatomia foliar e radicular. Pesquisas mostraram que sob condições de estresse hídrico, os genótipos de café apresentam plasticidade foliar, incluindo mudanças na espessura da parênquima paliçádico e esponjoso, bem como variações nas características estomáticas (Melo *et al.*, 2014). Para evitar a desidratação, nas folhas, ocorrem modificações anatômicas, tais como aumento na espessura da cutícula e mudanças na localização e formato dos estômatos. Nos vasos condutores, pode ocorrer uma redução no diâmetro e um aumento na frequência dos vasos do xilema, favorecendo o transporte de água e sais minerais e prevenindo a embolia nas plantas (Queiroz-Voltan *et al.*, 2014).

Estudo realizado por Coelho *et al.* (2022), avaliou genótipos de café arábica sob condições de déficit hídrico e destacou o papel das características fisiológicas e anatômicas para a manutenção do estado hídrico, conferindo potencial de tolerância ao déficit hídrico em plantas da cv. IPR 100 e as progênies 2, 5 e 7 do cruzamento entre 'Icatu Vermelho IAC 3851-2' × 'Catimor UFV 1602'.

2.3 Expressão gênica em qPCR e respostas moleculares em café arábica sob deficiência hídrica

Os recentes avanços na genômica do café, estão abrindo novas perspectivas para pesquisas relacionadas à genética da tolerância à seca. Esses estudos têm o potencial de identificar marcadores moleculares que podem ser utilizados para aprimorar e acelerar os programas de melhoramento do café.

Uma das técnicas amplamente utilizadas para estudos de tolerância à seca em cafeeiros cultivado com ou sem estresse hídrico é a RT-qPCR, ou PCR em tempo real. Esta técnica molecular é empregada para amplificar e quantificar RNA ou DNA em tempo real, sendo reconhecida como padrão-ouro na análise de expressão gênica devido à sua alta sensibilidade e precisão (Derveaux *et al.*, 2010).

A qPCR pode ser utilizada em diversas aplicações dependendo do tipo de molécula utilizada, DNA para detecção e quantificação de patógenos, detecção de mutações, alterações de cromatina; RNA/cDNA para expressão gênica, detecção de vírus de RNA, pequenos RNAs; e proteínas. A quantificação da expressão gênica, por meio da técnica de RT-qPCR, pode ser feita, a partir dos métodos de expressão absoluta ou expressão relativa (Arabkari *et al.*, 2019).

A expressão relativa na qPCR, é um método para quantificar a expressão de um gene alvo em relação à expressão de um ou mais genes de referência, cuja expressão é considerada constante em diferentes condições experimentais. Este método não fornece valores absolutos da quantidade de mRNA, mas sim a variação da expressão do gene alvo em comparação com uma condição controle ou outra amostra (Liviak *et al.*, 2001; Pereira, 2018).

Os genes de referência são validados experimentalmente para garantir sua estabilidade. Entre eles, a ubiquitina tem sido extensivamente estudada como gene de referência em análises de expressão gênica por qPCR em diversos contextos de pesquisa. Estudos destacaram a estabilidade e confiabilidade como gene de referência adequado para diferentes variedades,

tecidos, estágios de desenvolvimento e condições de estresse abiótico em plantas (Abbas *et al.* 2021).

Vários fatores podem influenciar os resultados da qPCR como, a qualidade e integridade do RNA; eficiência da transcrição reversa; seleção de genes de referência; eficiência dos *primers*; variação da quantidade de RNA; contaminação; condições de ciclagem e variação técnica (Derveaux *et al.* 2010).

Sob condições de escassez de água, as plantas de café desencadeiam uma série de respostas moleculares para sobreviver e se adaptar ao ambiente adverso. Estudos de expressão gênica em *Coffea arabica* tolerante ao déficit hídrico revelaram informações importantes sobre os mecanismos subjacentes à tolerância à seca nesta cultura economicamente significativa. Muitos destes mecanismos estão associados a genes que apresentam expressão diferencial entre clones ou cultivares tolerantes e suscetíveis cultivados sob diferentes (com ou sem) condições de irrigação (Marraccini *et al.*, 2012).

Os produtos dos genes induzidos por estresse podem ser classificados em dois grupos: aqueles que protegem diretamente contra estresses e aqueles que regulam a expressão de genes e a transdução de sinais em resposta ao estresse (Hasegawa *et al.*, 2000; Shinozaki *et al.*, 2003).

Pesquisas demonstraram que genótipos de café tolerantes à seca apresentam expressões gênicas específicas relacionadas a vias protetoras e reativas de eliminação de espécies de oxigênio (ROS), sinalização ABA e genes protetores de dessecação, como proteases aspárticas e proteínas de choque térmico (Marques *et al.*, 2023).

Em uma análise de cultivares de *C. arabica*, observou-se que vários genes candidatos relacionados às vias de sinalização do estresse hídrico, bem como à síntese de diversos compostos bioquímicos, como açúcares, foram expressos em níveis mais elevados no cultivar tolerante IAPAR 59 quando comparado ao cultivar suscetível Rubi MG 1192 durante o período de seca (Marracini *et al.*, 2012).

Além disso, estudos proteômicos indicaram que o *Coffea arabica* apresenta uma maior abundância de proteínas responsivas ao estresse envolvido em atividades antioxidantes sob déficit hídrico severo, proporcionando um potencial de aclimatação e resiliência aos déficits hídricos (Marques *et al.*, 2023). Como o *CaPYL8a*, responsável pela regulação da sinalização de receptores de ABA (Saavedra *et al.*, 2009), e o gene GCs, que codifica a enzima ascorbato peroxidase (APX), desempenhando uma função protetora nas células sob condições de estresse (Vieira *et al.*, 2013).

A expressão de genes candidatos em café arábica, como *CaERF017* e *CaAPX1*, contribuiu significativamente para a eficiência da fotossíntese em progênies de *Coffea arabica* tolerantes à seca (Santos *et al.*, 2021b). Além disso, diversos genes candidatos relacionados à tolerância e susceptibilidade ao estresse hídrico, com perfis de expressão diferencial, foram investigados em diferentes tecidos, incluindo folhas, raízes e botões plagiotrópicos de *C. canephora* (Costa, 2014; Vieira *et al.*, 2013) e *C. arabica* (Cotta *et al.*, 2016; Vieira *et al.*, 2013; Freire *et al.*, 2013). Esses estudos visam compreender as bases moleculares da resposta ao estresse hídrico, identificando marcadores genéticos que possam ser utilizados em programas de melhoramento para desenvolver cultivares mais resistentes.

A integração desses dados permite uma abordagem mais abrangente para melhorar a tolerância ao estresse hídrico em cafeeiros, contribuindo para a sustentabilidade da produção em cenários de mudanças climáticas

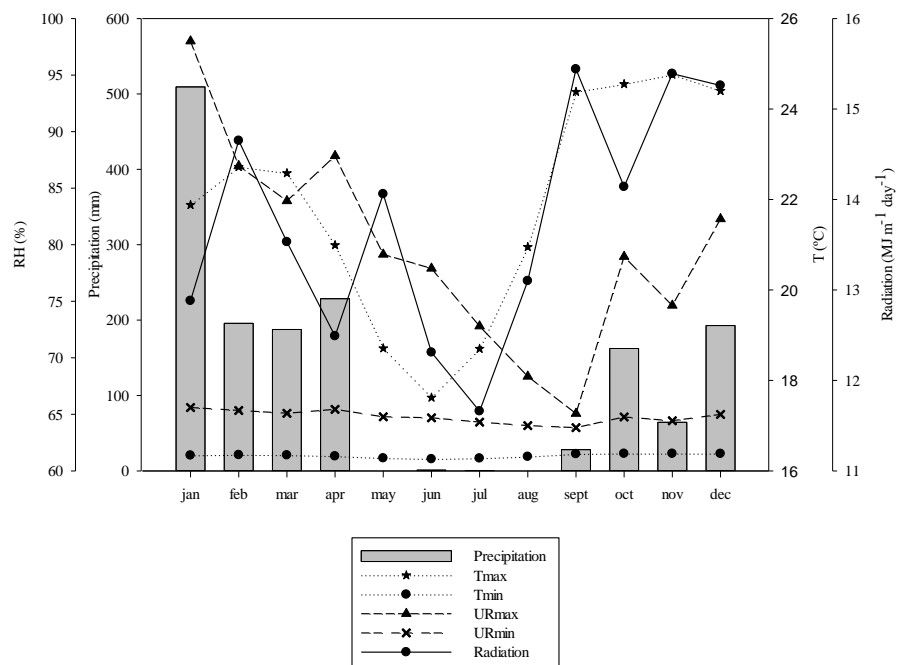
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

Os experimentos foram implantados em janeiro de 2023 no Campo Experimental da EPAMIG – Oeste (CEPC), localizado em Patrocínio, Minas Gerais, na região do Alto Paranaíba. As coordenadas geográficas são 18°59'26" de latitude sul e 46°59'01" de longitude oeste, com uma altitude local de 961 metros. O solo predominante é do tipo Latossolo Vermelho-amarelo, e a topografia é caracterizada como plana, com uma leve inclinação (Santos *et al.*, 2013c). Quanto ao clima, o município de Patrocínio - MG é classificado como Clima Subtropical Úmido, com invernos secos e estações chuvosas no verão, segundo a classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2013).

Os dados de precipitação, temperatura máxima, média e mínima, umidade relativa média do ar e radiação foram coletados por uma estação meteorológica automática A523, localizada no Campo Experimental da Epamig – Oeste e estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Representação gráfica das variáveis climatológicas registradas mensalmente, no ano de 2023, no município de Patrocínio, Minas Gerais.



Fonte: Da autora (2024).

Entre maio e setembro de 2023, Patrocínio experimentou uma estação seca com algumas características climáticas notáveis. As temperaturas médias durante este período mantiveram-se relativamente estáveis, com máximas em torno de 25 °C e mínimas de 16 °C. As precipitações foram baixas, especialmente em junho e julho, com ausência de chuvas, resultando em dias predominantemente secos e baixa umidade relativa do ar em torno de 65%. A baixa quantidade de chuva é típica para essa época do ano, refletindo as condições sazonais secas da região, um dos motivos que levaram a condução dos experimentos nesse local.

De acordo com um boletim técnico da Fundação Procafé sobre o balanço hídrico regional, foi registrado um déficit hídrico em torno de -150 mm no final de agosto de 2023 (Fundação Procafé, 2023).

3.2 Descrição dos experimentos

3.2.1 Material vegetal, formação de mudas, implantação dos experimentos e tratamentos culturais

Foram avaliados 17 genótipos de *Coffea arabica* L., sendo 16 cultivares e uma progênie, provenientes dos principais programas de melhoramento genético do cafeeiro (Tabela 1), que foram selecionados com base em critérios de produtividade, qualidade e resistência a doenças. Dentre eles, três cultivares foram escolhidas devido a estudos prévios que indicaram boa tolerância à limitação hídrica: IPR 100 (Carvalho *et al.*, 2017b), IAC Catuaí SH3 (Fazuoli *et al.*, 2015) e Acauã Novo (Santinato *et al.*, 2018).

Tabela 1 – Relação dos genótipos utilizados nos dois experimentos e suas instituições de origem (continua).

Genótipos	Instituição
IAC Catuaí SH3	IAC
IAC 125 RN	IAC
Obatã IAC 4739	IAC
Catuaí Amarelo IAC 62	IAC
Acauã Novo	Fundação Procafé
Arara	Fundação Procafé
Guará	Fundação Procafé

Tabela 1 – Relação dos genótipos utilizados nos dois experimentos e suas instituições de origem (conclusão).

Catuaí Amarelo 2SL	Fundação Procafé
IPR 100	IDR Paraná
IPR 103	IDR Paraná
MGS Catuaí Pioneira	EPAMIG
MGS Ametista	EPAMIG
H-29-1-85 (Icatu x Catimor)	EPAMIG
MGS Turmalina	EPAMIG
MGS Paraíso 2	EPAMIG
Catiguá MG2	EPAMIG

Fonte: MAPA (2024).

As sementes foram colhidas e preparadas em julho de 2022. No mês de agosto do mesmo ano, realizou-se a semeadura em bandejas de 32 células com substrato para as plantas à base de casca de pinus, turfa, vermiculita expandida, com macro e micronutrientes de liberação lenta (*Osmocote Plus Forth Cot*). Após a germinação, as mudas foram mantidas em viveiro até atingirem quatro pares de folhas verdadeiras e, após esse período, as mudas foram transplantadas no campo.

O plantio das mudas foi realizado em janeiro de 2023, com espaçamento de 3,5 metros entre linhas e 0,55 metros entre plantas, totalizando um estande de 5194 plantas por hectare.

Foram implantados dois experimentos idênticos. O primeiro experimento manteve-se a irrigação durante todo o período experimental. Já no segundo, as plantas foram irrigadas até início de junho e a irrigação foi suspensa até o final de agosto. Após esse período foi realizada a irrigação para avaliar a recuperação das cultivares.

Para a irrigação, adotou-se um sistema por gotejamento, sendo os gotejadores de 1,6 L h⁻¹ de vazão, espaçados a cada 0,55 m. Os tubos gotejadores foram abastecidos por um tubo de PVC de 50 mm utilizando água fornecida por reservatório local. A vazão do emissor foi de 1,6 L h⁻¹ m², ou seja, 1,6 mm h⁻¹. Seguiu-se o critério de manejo da irrigação do balanço hídrico do solo, a partir do Sistema de Monitoramento de Irrigação do Cerrado (Rocha *et al.*, 2006), fornecendo a lâmina líquida, intervalo e o momento de irrigação.

A adubação no plantio foi realizada de acordo com análise de solo, sendo fornecido 300 kg P₂O₅ por hectare, no sulco. O nitrogênio e potássio foram aplicados em cobertura cerca de 40 dias após o plantio. Para o fornecimento de nitrogênio e potássio em cobertura, foram utilizados 75 kg ha⁻¹ do nutriente, do formulado 20-00-20, parcelados em três vezes (a cada quarenta dias). Os micronutrientes foram fornecidos com 800 g ha⁻¹ do produto comercial Viça Café, aplicados via foliar em duas pulverizações, nos meses de fevereiro e abril.

O monitoramento de pragas e doenças ocorreu regularmente, sendo realizado preventivamente o controle de doenças e pragas de maior incidência na região, com produtos registrados para a cultura, seguindo as orientações dos fabricantes.

3.2.2 Delineamento experimental

Utilizou-se um delineamento em blocos casualizados, com 17 genótipos, e quatro repetições, totalizando 68 parcelas experimentais em cada experimento. Cada parcela experimental consistia em oito plantas, sendo a parcela útil das avaliações, as três plantas centrais.

3.2.3 Avaliações fisiológicas

Para a realização das análises fisiológicas foram selecionadas folhas completamente expandidas, do terceiro ou quarto par de folhas do ramo plagiotrópico, no terço médio das plantas.

As avaliações das trocas gasosas foram realizadas no período entre 8 e 11 horas da manhã, utilizando um sistema portátil de análise de gases por infravermelho (LI-6400XT Portable Photosynthesis System, LI-COR, Lincoln, USA), sob luz artificial (1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), onde foi quantificada a taxa fotossintética líquida (A - $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática ao vapor de água (gs - $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), taxa transpiratória (E - $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), eficiência instantânea no uso da água (EUA - $\mu\text{mol CO}_2 / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (A/E); déficit de pressão de vapor (DPV - KPa) e temperatura foliar (Tleaf - °C).

O estado da água nas folhas foi avaliado por meio da determinação do potencial hídrico na antemã (MPa) utilizando-se câmara de pressão tipo Scholander (PMS Instruments Plant Moisture-Model 1000). As folhas foram coletadas antes do amanhecer entre 3 e 5 horas da manhã e, posteriormente, acondicionadas em sacos plásticos e caixa térmica, para posterior mensuração do potencial hídrico.

3.2.4 Avaliações morfológicas

Foram realizadas avaliações da altura das plantas, diâmetro do caule e número de nós dos ramos ortotrópicos de cada planta. A altura das plantas (ALT – cm) foi medida do colo até a inserção do último nó do ramo ortotrópico, utilizando uma régua graduada. O diâmetro do caule (DCC – mm) foi medido na base do ramo ortotrópico com um paquímetro digital, e o número de nós do ramo ortotrópico (NRP) foi contado. A diferença entre essas medições no final e início da imposição do déficit hídrico permitiu calcular o incremento de crescimento de cada genótipo.

3.2.5 Avaliações anatômicas

Foram selecionadas nove cultivares com respostas fisiológicas e de crescimento contrastantes ao déficit hídrico para análises anatômicas foliares. Entre elas, destacaram-se aquelas com maior capacidade de manutenção do potencial hídrico e maior taxa fotossintética líquida e maior desenvolvimento em características morfológicas, como altura, número de ramos plagiotrópicos e diâmetro do caule. Para fins comparativos e para elucidar possíveis diferenças anatômicas entre as cultivares, também foram incluídas cultivares com menor desempenho nas características.

Para as análises utilizaram-se folhas completamente expandidas, do terceiro ou quarto par de folhas do ramo plagiotrópico, coletadas ao final do período seco, final do mês de agosto.

Para as secções transversais, as folhas foram coletadas e fixadas em F.A.A 70 (formaldeído: ácido acético: álcool) (Johansen, 1940), por 72 horas e posteriormente conservadas em etanol 70% (v.v-1), visando a conservação do material, em temperatura ambiente até o momento das análises. O material vegetal foi desidratado em série etílica crescente (80%, 90% e 100% v v⁻¹) e, após a desidratação, passou pelos processos de infiltração e polimerização em historesina à base de metacrilato, conforme a metodologia do fabricante (Leica Microsystems, Wetzlar, Alemanha). Posteriormente, foi seccionado com cerca de 8 µm de espessura, obtendo-se secções transversais das folhas, com o auxílio de um micrótomo rotativo semiautomatizado modelo MRP 2015 da marca Lupetec Tecnologia Aplicada (Lupe Indústria Tecnológica de Equipamentos para Laboratório, Brasil). As secções foram coradas com azul de toluidina a 1% (m v-1) (O' Brien; Feder; McCully, 1964) e as lâminas foram preparadas, utilizando-se verniz vitral (Acrilex Tintas Especiais S. A.) como meio de montagem.

As características avaliadas nas secções transversais foram: espessura da cutícula da face adaxial (CUT- μm), espessura do limbo foliar (LIM - μm), número de vasos do xilema (NVX), diâmetro dos vasos do metaxilema (DVX- μm), área total da região do xilema (AX - μm^2), área total da região do floema (AF - μm^2), frequência dos vasos do xilema ($\text{FVX} = \text{NVX}/\text{AX} * 1000000, \text{mm}^2$) e índice de vulnerabilidade dos vasos do xilema ($\text{IV} = \text{DVX}/\text{FVX}$) conforme proposto por Carlquist (1988). A condutividade hidráulica relativa (CHR) foi estimada usando equação de Hagen-Poiseuille modificada por Fahn; Werker e Baas (1986), onde: $\text{CHR} = r^4 * \text{FVX}, \mu\text{m}^4 10^6$), onde r é o raio individual dos vasos xilemáticos (Oliveira *et al.*, 2018a).

As características anatômicas das secções paradérmicas foram obtidas em folhas frescas usando a técnica de impressão da epiderme da face abaxial, na região mediana foliar (Segatto *et al.*, 2004), com auxílio do adesivo instantâneo universal (éster de cianoacrilato)..

Nas secções paradérmicas foram avaliados: número de estômatos (ne), que foi utilizado para calcular a densidade estomática ($\text{DEN} = \text{número de estômatos}/\text{mm}^2$), e os diâmetros polar (dp - μm) e equatorial dos estômatos (de - μm) utilizados para a relação entre o diâmetro polar e o diâmetro equatorial (DPDE) que é altamente correlacionada com funcionalidade estomática (Souza *et al.*, 2010).

As lâminas foram observadas e fotografadas em microscópio óptico, modelo Red 200 da marca Kasvi/Motic, acoplado à câmera digital modelo Moticam 5MP marca Motic. Para cada repetição dos tratamentos, foram feitas doze fotografias, nove de lâminas contendo secções transversais (três imagens da nervura principal, três do limbo foliar e três da cutícula da epiderme da face adaxial) e três de lâminas com secções paradérmicas, sendo sempre de secções diferentes. Posteriormente, as imagens foram analisadas com o software específico, para análise de imagens UTHSCSA-ImageTool, versão 3.0 (Uthscsa, 2021).

3.2.6 Avaliações moleculares

Para a análise diferencial da expressão gênica, foram selecionadas quatro cultivares com maiores valores médios da taxa fotossintética líquida e manutenção do potencial hídrico, além de uma cultivar sensível ao déficit hídrico, que apresentou os menores valores para essas características. Essa seleção visa elucidar as diferenças nas respostas moleculares entre cultivares tolerantes e suscetíveis.

a) Extração de RNA e quantificação

Para a análise de expressão gênica, foram maceradas 50mg do material vegetal em nitrogênio líquido. A extração de RNA foi realizada de acordo com as recomendações do protocolo (CONCERT).

Para avaliar a integridade das amostras extraídas, o RNA foi submetido à eletroforese em gel de agarose 1,0% corado com brometo de etídio. As amostras foram quantificadas em espectrofotômetro (Multiskan GO, Thermo Scientific). A qualidade foi avaliada pelo espectro (220-600 nm) com a razão OD260/OD280. Se a razão for menor que 1,8, pode indicar a presença de contaminação de proteínas nas amostras de RNA.

Após a quantificação, foi feita uma amostra única de RNA para cada tratamento, composta de 2,5 µg de cada repetição biológica, utilizando uma mistura equimolar de 325 ng de RNA de cada repetição para fazer a DNase. Com o objetivo de eliminar o DNA contaminante, foi realizado o tratamento com DNase I (1 µg para qRT-PCR), numa reação contendo os seguintes reagentes: 2,5 µL de DNase I (1 unid µg RNA) (RQ1 RNase-Free DNase[®]; Promega); 1 µL de tampão de reação 10X, completando com água estéril tratada para o volume final de 10 µL.

Depois, a amostra foi incubada no termociclador (T100, BIORAD) a 37 °C por 30 minutos. A inativação da DNase ocorreu mediante a adição de 1 µL da solução de parada (RQ1 DNase Stop Solution[®]; Promega) e incubação a 65 °C por 10 minutos. Após o tratamento com a DNase, retirou-se 8 µL do RNA tratado para a etapa de Transcriptase Reversa. A outra subamostra de 2 µL do RNA tratado com DNase foi armazenada a -20 °C.

b) Síntese de cDNA

A síntese reversa do mRNA para a obtenção da fita de DNA complementar (cDNA) foi realizada utilizando o kit ImProm-II[™] Reverse Transcriptase (Promega), conforme o protocolo do fabricante. Em microtubos estéreis, adicionou-se 1 µg de RNA total, 1 µL de oligo- dT15 concentração final de 10µM. A reação foi incubada a 70 °C por 5 minutos e rapidamente levada a 4 °C por 5 minutos, para desnaturação das estruturas secundárias e para o anelamento dos *primers* ao RNA. Após serem mantidas a 4 °C por 5 minutos acrescentou-se ao mesmo tubo 4 µL do tampão ImProm[™] 5x Reaction Buffer, 1 µL de RNase Out (40 U µL⁻¹), 2,4 µL de MgCl₂ na concentração de 25 µM, 1 µL do mix de dNTP na concentração final de 0,5 mM cada dNTP e 1 µL da enzima ImProm[™] Reverse Transcriptase e água Milli-Q para se completar o volume final de 20 µL. Os tubos foram incubados no termociclador, a 25 °C, durante 5 minutos para a

fase de anelamento. A reação foi incubada aos 42 °C por 60 minutos para a síntese da primeira fita de cDNA, sendo posteriormente incubada a 70 °C durante 15 minutos para inativar a enzima. As amostras de cDNA foram armazenadas a -20 °C.

c) Análises de expressões gênicas por meio de qPCR

Após a síntese dos cDNAs, estes foram diluídos em 1:10, 1:20 e 1:40, a fim de ser testados para escolha da melhor diluição para qPCR. Utilizando o protocolo recomendado para o 7500 Fast Real Time PCR Systems (Applied Biosystems), a diluição que teve melhor resultado no teste inicial foi a de 1:10.

Para cada reação de qPCR foi utilizado 1 µL de cDNA diluído, 0,2 µL do primer forward e 0,2 µL do primer reverse a 10mM cada, 5 µL do SYBR/qPCR MasterMix, GoTaq® (Promega) e 3,6 µL de água estéril, totalizando um volume final de 10µL por reação. Com o propósito de detectar a presença de contaminação, foi feito um controle negativo para cada *primer*, denominado NTC (no template control), sem o cDNA.

A quantificação de transcritos dos genes pesquisados foi padronizada usando os dados do gene constitutivo da ubiquitina como normalizador interno. As reações foram feitas em triplicatas. De acordo com Cruz *et al.* (2009), o gene CcUBQ10 codificando para a ubiquitina apresentou ser constitutivo e estável em vários tecidos de plantas de *C. arabica*, sendo portanto, um bom controle endógeno para experimentos de PCR quantitativo em tempo real.

As reações foram incubadas por 2 min a 50 °C, 5 min a 95 °C, 40 ciclos de amplificação de 3s a 95 °C e 30s a 60 °C, utilizando-se o 7500 Fast Real Time (Applied Biosystems, Foster City, CA, EUA).

d) Seleção de *primers*

Os primers utilizados para se analisar a expressão dos GCs (Apêndice 1), foram selecionados a partir dos estudos prévios. Como o estudo de Santos *et al.* (2021b), que identificaram os genes *CaMYB1*, *CaGolS3*, *CaAPX5*, *CaNCED*, *CaDHN1* e *CaPLY8a* sendo regulados positivamente em progênes de café arábica que exibem maior eficiência fotoquímica em condições de déficit hídrico, contribuindo para maior eficiência fotossintética em plantas tolerantes à seca. E as aquaporinas, regulada positivamente sob estresse hídrico, indicando seu papel no controle do estado da água em *Coffea arabica* (Santos; Mazzafera, 2013).

3.3 Análises estatísticas

Realizou-se uma análise de variância para cada um dos experimentos isoladamente. Para agrupar os experimentos e conduzir a análise conjunta dos dados, verificou-se a homogeneidade das variâncias usando o Teste de Bartlett (1937), atendendo aos critérios estabelecidos. As análises foram conduzidas no programa Sisvar versão 5.6 (Ferreira, 2014a). A significância das fontes de variação foi verificada pelo teste F ($P \leq 0.05$), e quando verificada diferença significativa procedeu-se com o teste de Scott-Knott para agrupamento das médias.

Para as análises moleculares os dados de PCR quantitativo em tempo real, foram analisados usando 7500 Fast Software v2.0.6 (Applied Biosystems) para determinar os valores do limite do ciclo (C_t). A especificidade dos produtos de PCR gerados para cada conjunto de *primers* foi verificada através da análise do T_m (dissociação) dos produtos amplificados e a eficiência foi calculada utilizando os dados de fluorescência absoluta obtidos durante a fase exponencial da amplificação de cada reação. O nível de expressão do gene é calculado por meio da equação $2^{-\Delta\Delta CT}$ (Quantificação Relativa) onde:

$$\Delta CT (\text{amostra}) = C_T (\text{gene alvo}) - C_T (\text{controle endógeno})$$

$$\Delta\Delta CT = \Delta CT (\text{amostra}) - \Delta CT (\text{calibrador interno})$$

Os níveis de expressão gênica foram normalizados para o nível de expressão da ubiquitina (CcUBQ10) como referência constitutiva (Barsalobres-Cavallari *et al.*, 2009). O C_T foi determinado pelo número de ciclos no qual a fluorescência gerada dentro de uma reação cruza o limiar (“*Threshold*”). O método usado foi o C_T comparativo (quantificação relativa).

A cultivar Obatã IAC 4739, neste estudo considerada como sensível ao déficit hídrico, em sistema irrigado no tempo zero foi utilizada como calibrador interno com expressão relativa igual a 1.

Para verificar a distinção entre os genótipos sob condições de irrigação e déficit hídrico durante o período seco, bem como para explorar correlações entre as características avaliadas, realizou-se uma análise de componentes principais. Para tanto foram considerados dados do mês de agosto de 2023, final do período seco. Os valores médios foram padronizados para ter média zero e variância unitária, utilizando a biblioteca FactoMineR e o software R versão 4.3.2 (R Core Team, 2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Crescimento de cafeeiros arábica durante o déficit hídrico

A avaliação morfológica dos 17 genótipos no início do período seco e no final, em agosto, permitiu observar como as plantas irrigadas e sob déficit hídrico se desenvolveram ao longo do tempo.

Foi observada diferença significativa para o tratamento hídrico para os incrementos de altura (IALT) e diâmetro de caule (IDC), onde as plantas que foram mantidas irrigadas tiveram maiores médias de incremento para essas características durante o período seco (Tabela 2).

Tabela 2 – Valores médios de incremento na altura (IALT) e diâmetro de caule (IDC) em genótipos de cafeeiro submetidos a dois tratamentos hídricos.

Regime hídrico	IALT (cm)	IDC (cm)
Irigado	11.99 a	0.29 a
Sequeiro	6.34 b	0.13 b

Médias seguidas da mesma letra na coluna pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2024).

Com base nas médias das características de crescimento descritas na Tabela 2, observou-se interação significativa entre genótipos e tratamentos hídricos apenas para a variável incremento do número de ramos plagiotrópicos (INRP) e também foi verificada diferença significativa entre os genótipos para a variável incremento de diâmetro de caule (IDC) (Tabela 3).

Tabela 3 – Valores médios de incremento na altura (IALT - cm), diâmetro de caule (IDC - cm) e número de ramos plagiotrópicos (INRP) em genótipos de cafeeiro submetidos a dois tratamentos hídricos (continua).

	Genótipo	IALT	IDC	INRP	
				IRRIGADO	SEQUEIRO
1	IAC Catuaí SH3	7.66 a	0.14 b	6.92 a A	4.29 a B
2	MGS Aranãs	7.67 a	0.12 b	5.50 b A	3.25 a B
3	Catuaí 2SL	9.74 a	0.20 b	7.46 a A	3.00 b B
4	Catiguá MG2	8.85 a	0.21 a	7.50 a A	2.13 b B
5	IPR 103	8.26 a	0.15 b	5.67 b A	2.13 b B

Tabela 3 – Valores médios de incremento na altura (IALT - cm), diâmetro de caule (IDC - cm) e número de ramos plagiotrópicos (INRP) em genótipos de cafeeiro submetidos a dois tratamentos hídricos (conclusão).

6	Acauã Novo	9.28 a	0.24 a	7.54 a A	4.13 a B
7	Guará	8.69 a	0.24 a	6.84 a A	3.63 a B
8	MGS Catucaí Pioneira	9.36 a	0.24 a	5.33 b A	2.39 b B
9	Obatã IAC 4739	9.32 a	0.24 a	5.64 b A	3.63 a B
10	Arara	8.83 a	0.19 b	5.67 b A	3.88 a B
11	MGS Ametista	11.79 a	0.21 a	7.09 a A	3.63 a B
12	IPR 100	9.29 a	0.32 a	6.63 a A	4.34 a B
13	IAC 125 RN	11.67 a	0.30 a	6.92 a A	3.38 a B
14	H-29-1-85	9.36 a	0.23 a	7.50 a A	2.25 b B
15	Catuaí Amarelo IAC 62	8.73 a	0.23 a	5.60 b A	3.00 b B
16	MGS Turmalina	6.79 a	0.17 b	5.42 b A	3.63 a B
17	MGS Paraíso 2	10.58 a	0.19 b	6.54 a A	4.00 a B
	Média	9,16	0,21	6,42	3,33
	CV (%)	29	42,19	23,32	23,32

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2024).

Em relação ao incremento do número de ramos plagiotrópicos (INRP), notou-se que o déficit hídrico impactou negativamente o número de ramos plagiotrópicos nas plantas mantidas sem irrigação de todos os genótipos durante o período seco, visto que, as plantas sob irrigação demonstraram maiores valores médios de número de ramos plagiotrópicos produzidos durante esse período (Tabela 3).

Assim, no regime de sequeiro, os genótipos foram divididos em dois grupos com base no teste de agrupamento Scott-Knott. O grupo com maior INRP incluiu os genótipos 1, 2, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 16 e 17, com variação de 3,25 a 4,34 ramos plagiotrópicos produzidos sob déficit hídrico. No regime irrigado, os genótipos 1, 3, 4, 6, 7, 11, 12, 13, 14 e 17 apresentaram maiores valores médios de INRP, variando entre 6,54 e 7,54 (Tabela 3).

O número de ramos plagiotrópicos em plantas de café arábica desempenha um papel crucial na determinação dos resultados da produção. Pesquisas indicam que maiores números de ramos plagiotrópicos sustentam a produção com menor desgaste metabólico em plantas de café arábica (Colodetti *et al.*, 2023).

Estudos realizados por Carvalho *et al.* (2006a) sobre a evolução do número de ramos plagiotrópicos em plantas de café arábica em diferentes regimes de irrigação, observaram que

os menores valores do número de ramos plagiotrópicos foram em plantas dos tratamentos não irrigados, e que o aumento do número de ramos plagiotrópicos com a irrigação pode aumentar o número de gemas, influenciando diretamente a produção.

Ao comparar o mesmo genótipo nos dois regimes hídricos para a variável INRP, observa-se, que os genótipos 1, 6, 7, 11, 12, 13 e 17 se destacaram positivamente nas duas condições hídricas (Tabela 3).

Plantas não irrigadas tendem a apresentar altura inferior às irrigadas, devido à restrição hídrica que pode afetar os processos metabólicos de crescimento das plantas (Kramer; Boyer, 1995). Este resultado está em concordância com estudos anteriores, nos quais também foram registrados valores mais elevados de altura das plantas quando cultivadas sob irrigação, conforme mencionado por Alves (1999) e Karasawa *et al.* (2001). Em uma pesquisa realizada em Rondônia, constatou-se que o café arábica submetido à irrigação alcançou uma altura de planta superior em comparação com as plantas não irrigadas (Rodrigues *et al.*, 2010b).

As variações entre os genótipos podem não ser evidentes devido à forte interação entre eles e as condições ambientais do período seco, principalmente a influência de temperaturas baixas, o que pode ter contribuído para um crescimento similar em ambos os tratamentos. Vários estudos relataram que o cafeeiro apresenta decréscimo acentuado na taxa de crescimento nos meses com baixas temperaturas (Libardi; Amaral; Amaral, 1998; Amaral; Rena; Amaral, 2006; Nazareno *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2004c; Partelli *et al.*, 2009). Além disso, o período curto entre as avaliações, pode não ter sido suficiente para que os genótipos se diferenciassem em relação à altura.

Quanto ao incremento de diâmetro de caule (IDC), os genótipos foram categorizados em dois grupos com base no teste de agrupamento Scott-Knott. O grupo com maior diâmetro de caule incluiu as plantas dos genótipos 4, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14 e 15 (Tabela 3).

Estudos realizados por Fialho *et al.* (2010) observaram uma redução significativa não apenas na altura das plantas da cultivar Catuaí Vermelho, mas também no diâmetro do caule ao nível do colo, causada pela diminuição da disponibilidade hídrica. Já outro estudo realizado por Santana *et al.* (2004), utilizando sistema de irrigação por gotejamento, avaliou duas cultivares de cafeeiro, IAPAR-59 e Obatã. Os resultados revelaram que nos tratamentos com irrigação, o diâmetro do caule aumentou mais rapidamente em comparação com os não irrigados, os quais demandaram mais tempo para atingir um diâmetro superior.

Os genótipos exibiram diferenças significativas no crescimento, conforme evidenciado pelas médias das características morfológicas apresentadas nas Tabelas 2 e 3. É notável que os genótipos Acauã Novo (6), Guará (7), MGS Ametista (11), IPR 100 (12) e IAC 125 RN (13) se destacaram com melhor desempenho fenotípico para as características avaliadas em comparação com os demais.

As respostas ao estresse hídrico podem variar entre espécies e genótipos de uma mesma espécie, tornando alguns mais adaptados a essa condição (Canales *et al.*, 2021).

Uma das primeiras respostas à deficiência hídrica é a redução do crescimento, uma estratégia utilizada pelas plantas para evitar a desidratação. A baixa disponibilidade de água no solo afeta negativamente a divisão e o alongamento celular. Ao reduzir a área exposta, a planta diminui a transpiração excessiva e, conseqüentemente, reduz a demanda por água (Baccari *et al.*, 2020).

4.2 Potencial hídrico e trocas gasosas

Na primeira avaliação do potencial hídrico antemanhã (MPa), em junho, início da imposição do déficit hídrico do sequeiro, não foi observada interação significativa entre os genótipos e os tratamentos hídricos para as variáveis avaliadas.

No geral, os genótipos apresentaram valores semelhantes para as variáveis taxa fotossintética (A), eficiência do uso da água (EUA) e potencial hídrico foliar na antemanhã (MPa). Essa ausência de variabilidade dos genótipos em relação ao tratamento hídrico pode estar relacionada à disponibilidade hídrica do solo, ou seja, no início da imposição do déficit hídrico as plantas estavam hidratadas nos dois tratamentos hídricos.

A taxa transpiratória (E) foi maior nas cultivares IAC 125 RN e Catuaí Amarelo IAC 62. As cultivares 2, 4, 6, 8, 9, 10, 12, 16 e 17 apresentaram menor condutância estomática (gs). Menores médias de déficit de pressão de vapor (DPV) foram observadas nas cultivares 3, 13, 14 e 15. Quanto à temperatura foliar (Tleaf), as temperaturas foliares mais baixas foram registradas nas cultivares 3, 10, 13, 14, 15 e 16 (Tabela 4).

Tabela 4 – Taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (gs), taxa transpiratória (E) déficit de pressão de vapor (DPV), temperatura foliar (Tleaf), eficiência do uso da água (EUA – A/E) e potencial hídrico foliar na antemanhã (MPa) avaliados em cafeeiro arábica ao início do período seco.

Cultivar/Progênie	A	gs	E	DPV	Tleaf	EUA	MPa
1 IAC Catuaí SH3	7.47 a	0.109 a	2.35 b	2.17 a	27.48 a	3.92 a	-0.21 a
2 MGS Aranãs	7.86 a	0.094 b	2.19 b	2.22 a	27.58 a	3.96 a	-0.21 a
3 Catucaí 2SL	9.15 a	0.010 a	2.13 b	2.03 b	26.68 b	4.75 a	-0.31 a
4 Catiguá MG2	7.68 a	0.083 b	2.03 b	2.17 a	27.30 a	3.83 a	-0.31 a
5 IPR 103	8.33 a	0.101 a	2.26 b	2.16 a	27.34 a	4.17 a	-0.18 a
6 Acauã Novo	7.94 a	0.086 b	1.99 b	2.17 a	27.24 a	4.12 a	-0.20 a
7 Guará	6.95 a	0.104 a	2.19 b	2.15 a	27.23 a	3.51 a	-0.16 a
8 MGS Catucaí Pioneira	8.27 a	0.084 b	2.00 b	2.21 a	27.57 a	4.25 a	-0.19 a
9 Obatã IAC 4739	7.95 a	0.089 b	2.09 b	2.22 a	27.55 a	3.94 a	-0.21 a
10 Arara	8.56 a	0.082 b	1.97 b	2.16 a	27.13 b	4.42 a	-0.20 a
11 MGS Ametista	8.13 a	0.104 a	2.36 b	2.16 a	27.31 a	3.56 a	-0.21 a
12 IPR 100	8.37 a	0.063 b	1.65 b	2.34 a	27.99 a	4.65 a	-0.27 a
13 IAC 125 RN	8.57 a	0.137 a	2.88 a	1.98 b	26.78 b	3.19 a	-0.32 a
14 H-29-1-85	6.93 a	0.108 a	2.24 b	2.02 b	26.64 b	3.40 a	-0.23 a
15 Catuaí Amarelo IAC 62	8.33 a	0.119 a	2.61 a	2.03 b	26.89 b	3.28 a	-0.24 a
16 MGS Turmalina	7.35 a	0.091 b	2.02 b	2.13 a	27.05 b	3.82 a	-0.21 a
17 MGS Paraíso 2	8.02 a	0.084 b	2.04 b	2.22 a	27.54 a	3.84 a	-0.24 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2024).

Na segunda avaliação, realizada 60 dias após a suspensão da privacidade no tratamento sequeiro, foi possível identificar o murchamento foliar em algumas plantas desse tratamento, um sintoma visível específico da privação de água nos tecidos vegetais. Foi observada interação entre genótipos e os ambientes estudados para as seguintes variáveis: A, gs, EUA, DPV e MPa (Tabela 5).

Tabela 5 – Taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (gs), taxa transpiratória (E), déficit de pressão de vapor (DPV), temperatura foliar (Tleaf), eficiência do uso da água (EUA – A/E) e potencial hídrico foliar na antemanhã (MPa) avaliados em cafeeiro arábica aos 60 dias de suspensão da irrigação em dois tratamentos hídricos I – irrigado e S – sequeiro.

Cultivar/Progênie	A		gs		E	EUA		Tleaf	DPV		MPa	
	I	S	I	S		I	S		I	S	I	S
1 IAC Catuaí SH3	6.79 a A	5,83 b B	0.036 a A	0.027 a B	1.87 a	3.17 a A	3.79 b A	35.74 b	4.60 a A	3.72 b B	-0.48 a A	-1.16 a B
2 MGS Aranãs	7.79 a A	5.63 b B	0.030 b A	0.018 b B	1.85 a	4.01 a A	4.87 b A	35.75 b	4.75 a A	4.00 b A	-0.63 a A	-1.06 a A
3 Catucaí 2SL	7.70 a A	6.27 b B	0.043 a A	0.025 a B	1.91 a	2.95 a B	4.17 b A	35.93 b	3.99 a B	4.60 a A	-0.83 a A	-2.05 b B
4 Catiguá MG2	6.94 a A	5.56 c B	0.029 b A	0.019 b B	1.30 b	4.46 a A	5.68 b A	36.54 a	4.69 a A	4.57 a A	-0.74 a A	-1.33 a B
5 IPR 103	7.08 b A	4.71 c B	0.036 a A	0.021 b B	1.41 b	4.34 a A	3.46 c A	35.97 b	4.51 a A	4.27 b A	-0.78 a A	-1.98 b B
6 Acauã Novo	7.35 a A	6.06 b B	0.030 b A	0.019 b B	1.47 b	3.95 a B	5.80 b A	35.95 b	4.51 a A	4.31 b A	-0.48 a A	-0.98 a B
7 Guará	7.04 a A	3.33 d B	0.030 b A	0.020 b B	1.37 b	4.09 a A	3.32 c A	36.12 a	4.57 a A	4.22 b A	-0.44 a A	-1.39 a B
8 MGS Catucaí Pioneira	6.78 a A	5.11 c A	0.041 a A	0.023 a B	1.66 a	3.33 a B	6.30 a A	36.17 a	4.32 a A	4.41 a A	-0.61 a A	-1.41 a B
9 Obatã IAC 4739	5.79 b A	3.80 d B	0.036 a A	0.020 b B	1.38 b	3.16 a B	3.96 b A	36.38 a	4.56 a A	4.20 b A	-0.79 a A	-1.78 b B
10 Arara	6.16 b A	6.49 b A	0.030 b A	0.018 b B	1.21 b	4.19 a B	7.87 a A	36.28 a	4.35 a A	4.67 a A	-0.59 a A	-1,10 a B
11 MGS Ametista	7.31 a A	6.27 b B	0.040 a A	0.027 a B	1.76 a	3.46 a A	4.84 b A	35.75 b	4.36 a A	4.02 b A	-0.45 a A	-1.75 b B
12 IPR 100	6.80 a A	4.94 c B	0.032 b A	0.017 b B	1.47 b	3.69 a B	7.05 a A	35.02 c	4.50 a A	4.26 b A	-0.65 a A	-1.71 b B
13 IAC 125 RN	6.93 a A	7.41 a A	0.028 b A	0.025 a A	1.48 b	4.21 a B	7.15 a A	36.68 a	4.54 a A	4.70 a A	-0.66 a A	-1.48 a B
14 H-29-1-85	7.48 a A	5.01 c B	0.034 b A	0.031 a A	1.75 a	4.59 a A	3.51 c A	36.15 a	4.37 a A	4.15 b A	-0.51 a A	-1.95 b B
15 Catuaí Amarelo IAC 62	7.19 a A	5.18 c B	0.031 b A	0.030 a A	1.70 a	3.73 a A	4.49 b A	36.32 a	4.63 a A	4.33 b A	-0.58 a A	-1.36 a B
16 MGS Turmalina	7.00 a A	5.25 c B	0.030 b A	0.029 a A	1.68 a	3.88 a A	4.44 b A	35.94 b	4.44 a A	4.17 b A	-0.55 a A	-1.34 a B
17 MGS Paraíso 2	7.22 a A	6.12 b B	0.036 a A	0.026 a B	1.41 b	4.51 a A	5.50 b A	35.74 b	4.43 a A	4.32 b A	-0.75 a A	-0.98 a A

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2024).

De maneira geral, houve redução no potencial hídrico de antemanhã, taxa fotossintética líquida, condutância estomática e aumento da eficiência do uso da água nas plantas dos genótipos do tratamento sequeiro em relação ao irrigado (Tabela 5).

Em relação ao potencial hídrico (MPa), não foi observada diferença significativa entre os genótipos das plantas que permaneceram irrigadas durante o período seco. O status hídrico dessas plantas se manteve aproximadamente em torno de - 0,83 MPa, indicando que elas estavam bem hidratadas. Em comparação, no ambiente sequeiro, o potencial hídrico variou em média entre -0,98 e -2,05 MPa, indicando sinais de escassez hídrica. Além disso, os cafeeiros jovens sob déficit hídrico, foram divididos em dois grupos distintos (Tabela 5).

O primeiro grupo, composto pelos genótipos 1, 2, 4, 6, 7, 8, 10, 13, 15, 16 e 17, apresentaram maiores potenciais hídricos, acima de -1,5 MPa, ou seja, mesmo sob restrição hídrica, apresentaram melhor manutenção do potencial hídrico. O grupo dois, composto pelos genótipos 3, 5, 9, 11, 12 e 14, exibiu potenciais hídricos mais baixos, variando em média de -1,7 a -2,05 MPa (Tabela 6).

Nosso resultado, corrobora com os estudos realizados por Santinato et al. (2019), que investigaram a tolerância ou susceptibilidade de cultivares de café arábica no Cerrado Mineiro, em lavouras com 3,5 anos de idade, onde destacaram-se as cultivares MGS Aranãs (2), Acauã Novo (6) e MGS Paraíso 2 (17). Essas cultivares apresentaram potenciais hídricos mais elevados mesmo sob um déficit de -142 mm em Carmo do Rio Paranaíba.

Pesquisas sobre genótipos de *Coffea arabica* revelaram que os genótipos 'IPR 100', e as progênies 2, 5 e 7 oriundas do cruzamento entre 'Icatu Vermelho IAC 3851-2' × 'Catimor UFV 1602' exibiram maiores potenciais hídricos em condições de déficit hídrico (Coelho *et al.*, 2022). No estudo conduzido por Reis *et al.* (2015), as cultivares Siriema 24 e Catuaí Vermelho IAC 144 demonstraram uma maior resistência em atingir o potencial hídrico severo (-3,0 MPa) em comparação com os demais genótipos avaliados pelos autores.

Parâmetros de trocas gasosas como fotossíntese líquida (A), transpiração (E) e condutância estomática (gs) são indicadores sensíveis de déficit hídrico nas plantas (Silva *et al.*, 2022d).

As plantas que permaneceram no sequeiro apresentaram uma redução na taxa fotossintética líquida (A) em comparação com os cafeeiros irrigados. Sob déficit hídrico, os genótipos de café se dividiram em quatro grupos distintos com base nas respostas de seus parâmetros de trocas gasosas: grupo 1, apenas o genótipo IAC 125 RN (13) apresentou maiores valores médios de A, gs, eficiência do uso da água (EUA), maior potencial hídrico (MPa) e

menor transpiração (E), destacando-se como uma importante estratégia de tolerância à seca. O grupo 2, incluindo os genótipos 1, 2, 3, 6, 10, 11 e 17, apresentaram taxas fotossintéticas líquidas menores em relação à cultivar IAC 125 RN (13) sob déficit hídrico e incluem genótipos contrastantes em relação aos valores de potencial hídrico foliar, associados a valores moderados de gs, E, EUA, Tleaf e DPV. O grupo 3, composto pelos genótipos 4, 5, 8, 12, 14, 15 e 16, exibindo valores mais reduzidos de fotossíntese líquida (A), nesse grupo destacam-se os genótipos 14, 15 e 16 que apresentaram maiores valores de condutância estomática (gs) e taxa transpiratória (E). E por último o grupo 4, incluindo os genótipos Guará (7) e Obatã IAC 4739 (9), que apresentaram as menores taxas fotossintéticas, associadas a valores reduzidos de gs, E e EUA quando comparados ao IAC 125 RN (Tabela 5).

Vale ressaltar, também o genótipo Catucaí Amarelo 2SL (3), que apresentou menor potencial hídrico no sequeiro em relação aos demais genótipos avaliados neste estudo, associado a alta taxa transpiratória (E) e DPV, e valores médios de A e gs, o que pode também ser caracterizada como estratégia de tolerância à seca. No entanto, quando se compara seu crescimento em relação ao genótipo IAC 125 RN (13), nota-se uma redução no incremento de DDC e NRP (Tabelas 3 e 6).

De acordo com o estudo de Martins *et al.* (2014c), a fotossíntese no café é limitada principalmente por fatores estomáticos, seguidos por limitações associadas ao mesófilo e restrições bioquímicas (Franck *et al.*, 2006, Silva *et al.*, 2006a). Entretanto, o fechamento estomático gradual aumenta a resistência à difusão do CO₂ para o sítio catalítico da rubisco, o que tem um efeito adverso nos níveis de carbono intercelular, resultando em uma diminuição na taxa de fotossíntese (Damour; Vandame; Urban, 2009).

Em relação à variável EUA, no ambiente irrigado os genótipos não apresentaram diferença entre eles. No entanto, quando comparados ao sequeiro, nota-se que os maiores valores de EUA se deram em baixa disponibilidade hídrica no período seco. As plantas dos genótipos no sequeiro foram divididas em três grupos, de acordo com o testes Scott-knott, sendo que os genótipos 5, 7 e 14 apresentaram menor eficiência do uso da água sob restrição hídrica, enquanto que os genótipos 8, 10, 12 e 13 apresentaram maiores valores médios para essa característica (Tabela 5).

Pesquisas conduzidas por DaMatta *et al.* (2003) revelaram que dois clones da espécie *Coffea canephora*, pertencentes à variedade Conillon (Clone 46 e clone 120), responderam de maneira diferente à condição de solo seco. Em períodos prolongados de seca, o clone 120 mostrou maior eficiência no uso da água que o 46, possibilitando a manutenção da taxa

fotossintética e tornando-se, conseqüentemente, mais apto a produzir nessa condição de estresse.

Em nosso presente estudo, os genótipos Arara (10) e IAC 125 RN, que destacaram-se por maiores valores de A, também apresentaram maior EUA sob déficit hídrico (Tabela 5). Em *C. arabica*, parece existir uma relação direta entre eficiência do uso da água e tolerância à seca (Meinzer; Goldstein; Grantz, 1992).

Na Tabela 6, para temperatura foliar (Tleaf) observou-se maiores valores médios no tratamento irrigado. Sob condições de altas temperaturas e disponibilidade hídrica no solo, a transpiração nas plantas irrigadas pode ter superado a capacidade das folhas de dissipar calor, contribuindo para o aumento da temperatura foliar mesmo com privacidade. (Taiz; Zeiger, 2017).

Tabela 6 – Temperatura foliar (Tleaf) avaliada em cafeeiro arábica aos 60 dias de período seco submetido a dois tratamentos hídricos, no período seco.

Regime hídrico	Tleaf
Irigado	36.27 a
Sequeiro	35.89 b

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2024).

Na terceira avaliação, ao avaliar a recuperação do potencial hídrico de antemanhã dos genótipos após o retorno da irrigação, foi observada diferença significativa para os tratamentos hídricos para as variáveis gs, E, EUA, DPV e Tleaf. As plantas do sequeiro, após reirrigadas, apresentaram maiores valores médios de gs e E. Já as plantas que permaneceram irrigadas no período experimental, apresentaram maior EUA, DPV e Tleaf (Tabela 7).

Tabela 7 – Condutância estomática (gs), taxa transpiratória (E), eficiência do uso da água (EUA – A/E), déficit de pressão de vapor (DPV) e temperatura foliar (Tleaf) avaliados em cafeeiro arábica dois dias após o retorno da irrigação.

Regime hídrico	gs	E	EUA	DPV	Tleaf
Irigado	0.050 b	2.26 b	2.43 a	4.02 a	35.14 a
Sequeiro	0.068 a	3.00 a	1.87 b	3.87 b	34.73 b

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2024).

Os genótipos que passaram pelo período seco sob restrição hídrica, avaliados nesse experimento, apresentaram uma boa recuperação do estado hídrico das plantas após a reirrigação, com destaque para os genótipos 1, 2, 6, 12, 13 e 17 que apresentaram recuperação do MPa semelhantes às plantas irrigadas, enquanto os genótipos 3, 4, 5, 7, 8, 9, 14, 15 e 16 apresentaram uma recuperação hídrica mais gradual (Tabela 8).

Tabela 8 – Taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (gs), taxa transpiratória (E), déficit de pressão de vapor (DPV), temperatura foliar (Tleaf), eficiência do uso da água (EUA – A/E) e potencial hídrico foliar na antemanhã (MPa) avaliados em cafeeiro arábica após o retorno da irrigação. I- irrigado. S – sequeiro.

Cultivar/Progênie	A		gs	E	EUA	DPV	Tleaf	MPa	
	I	S						I	S
1 IAC Catuaí SH3	5.55 a A	7.28 a A	0.059 a	2.74 a	2.38 a	4.06 a	35.34 a	-0.38 a A	-0.46 a A
2 MGS Aranãs	4.55 a A	6.01 a A	0.072 a	3.12 a	1.90 a	3.84 b	34.78 b	-0.56 a A	-0.45 a A
3 Catucaí 2SL	5.83 a A	3.51 b B	0.062 a	2.70 a	1.74 a	3.80 b	34.49 b	-0.33 a A	-0.73 c B
4 Catiguá MG2	5.82 a A	5.37 a A	0.061 a	2.68 a	2.04 a	3.93 a	34.92 b	-0.51 a A	-0.74 c B
5 IPR 103	4.94 a A	4.31 a A	0.065 a	2.82 a	1.95 a	3.79 b	34.54 b	-0.44 a A	-0.84 c B
6 Acauã Novo	4.51 a A	5.32 a A	0.055 a	2.46 a	2.24 a	3.99 a	35.06 a	-0.29 a A	-0.35 a A
7 Guará	5.45 a A	4.59 a A	0.055 a	2.45 a	2.23 a	3.99 a	35.02 a	-0.40 a A	-0.76 c B
8 MGS Catucaí Pioneira	4.26 a B	6.65 a A	0.060 a	2.75 a	2.23 a	3.94 a	34.99 a	-0.46 a A	-0.78 c B
9 Obatã IAC 4739	4.82 a A	4.95 a A	0.060 a	2.68 a	2.03 a	4.00 a	35.06 a	-0.48 a A	-0.85 c B
10 Arara	4.74 a A	4.79 a A	0.053 a	2.41 a	2.30 a	3.96 a	34.91 b	-0.49 a A	-0.61 b A
11 MGS Ametista	5.92 a A	4.89 a A	0.059 a	2.68 a	2.19 a	3.97 a	35.04 a	-0.43 a A	-0.66 b B
12 IPR 100	4.65 a A	4.99 a A	0.058 a	2.56 a	2.36 a	4.00 a	35.14 a	-0.39 a A	-0.50 a A
13 IAC 125 RN	5.34 a A	4.28 a A	0.057 a	2.51 a	1.99 a	3.91 b	34.80 b	-0.49 a A	-0.55 a A
14 H-29-1-85	6.53 a A	5.80 a A	0.064 a	2.77 a	2.36 a	3.88 b	34.79 b	-0.45 a A	-0.91 c B
15 Catuaí Amarelo IAC 62	5.81 a A	4.16 a A	0.072 a	3.14 a	1.99 a	3.83 b	34.78 b	-0.58 a A	-0.86 c B
16 MGS Turmalina	4.30 a A	4.61 a A	0.046 a	2.12 a	2.21 a	3.98 a	34.91 b	-0.54 a A	-0.75 c B
17 MGS Paraíso 2	4.23 a B	5.63 a A	0.044 a	2.15 a	2.46 a	4.12 a	35.35 a	-0.44 a A	-0.41 a A

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2024).

Martim (2003), ao investigar a recuperação do potencial hídrico foliar de mudas da cultivar Topázio MG1190 com suspensão de rega, observou que, após 24 horas da reirrigação, houve uma melhoria no potencial hídrico foliar, passando de -2,1 MPa para -1,6 MPa no décimo dia do experimento.

Os cafeeiros do tratamento em sequeiro recuperaram consideravelmente seu potencial fotossintético após a reirrigação (Tabela 8), com exceção do genótipo Catucaí 2SL, que apresentou menor A em relação aos demais. Em situações de déficit hídrico, no qual as plantas alcançam potenciais hídricos mais baixos, a capacidade de recuperação das plantas pode ser mais lenta ou até mesmo comprometida, especialmente durante a fase inicial de desenvolvimento da lavoura, quando as plantas têm uma área foliar menor e um sistema radicular menos desenvolvido. Estudos anteriores indicam que o período de recuperação está relacionado à severidade do estresse hídrico, pois isso determina até que ponto as funções fisiológicas são comprometidas (Brodribb; Cochard, 2009).

Também é possível notar que as plantas após a reirrigação apresentaram condutância estomática (gs) e transpiração (E) semelhantes ou superiores ao controle irrigado (Tabelas 7 e 8).

Plantas resilientes têm uma capacidade melhorada de recuperação após o estresse hídrico. Uma recuperação rápida e eficaz é essencial para restaurar as funções fisiológicas e metabólicas normais, garantindo a retomada do crescimento e da produção após o alívio da seca (Melke; Fetene, 2014)

Vale ressaltar, que os valores mais discretos de A na terceira avaliação, são reflexos das ondas de calor de setembro de 2023. No campo, as temperaturas diárias estavam mais elevadas, a umidade relativa do ar mais baixa e a radiação solar mais elevadas, o que contribuiu para menor A, nos dois tratamentos hídricos e maiores parâmetros de DPV, gs, E e Tleaf (Figura 1, Tabela 8).

4.2.1 Caracterização anatômica de cafeeiros arábica sob condições irrigada e de sequeiro durante o período seco

A análise conjunta dos dados anatômicos de cafeeiros cultivados em regime irrigado (I) e sequeiro (S) durante o período seco mostrou efeito significativo em diversas características anatômicas entre os genótipos estudados.

Na Tabela 9, são apresentados os dados referentes à espessura da cutícula da face adaxial (CUT) e do limbo foliar (LIM). Para CUT observou-se diferença significativa apenas entre os

genótipos avaliados, sendo que os genótipos MGS Aranãs (2), IPR 103 (5), Acauã Novo (6), MGS Ametista (11) e IAC 125 RN(13) apresentaram maiores espessuras de cutícula, enquanto IAC Catuaí SH3(1), Obatã Amarelo IAC 4739 (9), Arara (10) e MGS Paraíso 2 (17) mostraram menores valores.

Tabela 9 – Valores médios da espessura da cutícula da face adaxial (CUT - μm) e de limbo foliar (LIM - μm), avaliados em genótipos de *Coffea arabica* L. após a imposição do déficit hídrico.

Genótipos	CUT	LIM	
		I	S
1 IAC Catuaí SH3	1,55 b	328,32 a A	340,75 a A
2 MGS Aranãs	1,79 a	329,62 a A	315,65 a A
5 IPR 103	1,45 b	311,63 a A	333,06 a A
6 Acauã Novo	1,67 a	303,37 b A	278,43 a A
9 Obatã IAC 4739	1,44 b	275,53 b A	259,97 a A
10 Arara	1,63 b	291,37 b A	259,97 a A
11 MGS Ametista	1,76 a	324,97 a A	317,10 a A
13 IAC 125 RN	1,81 a	297,84 b A	319,05 a A
17 MGS Paraíso 2	1,53 b	276,87 b B	351,34 a A

Legenda: I: Irrigado; S: Sequeiro.

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúsculas na linha pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância

Fonte: Da autora (2024).

Dentre os cafeeiros que apresentaram maior espessura da cutícula, MGS Aranãs (2), Acauã Novo (6), MGS Ametista (11) e IAC 125 RN (13) exibiram boa manutenção do potencial hídrico associado às trocas gasosas, enquanto os genótipos Obatã Amarelo IAC 4739 (9) e IPR 103 (5) que possuem menores espessuras de cutícula, se encontram na faixa com menores potenciais hídricos e taxa fotossintética (Tabela 5).

A cutícula desempenha papel importante no aumento da tolerância à seca em plantas de café, devido sua composição lipídica, organiza-se como uma barreira para evitar a perda descontrolada de água não-estomática. O aumento da permeabilidade da cutícula afeta mais a taxa de transpiração do que a assimilação de CO_2 (Wang *et al.*, 2020; Ilyas *et al.*, 2021).

Para variável espessura de limbo foliar (LIM), a análise conjunta mostrou efeitos significativos da interação genótipo x tratamentos hídricos (Tabela 9).

Sob irrigação, verificou-se diferença da espessura do limbo foliar entre os genótipos. Os cafeeiros Acauã Novo, Obatã Amarelo IAC 4739, Arara, IAC 125 RN e MGS Paraíso 2 apresentaram menores valores de LIM (Tabela 9). O monitoramento da espessura das folhas

pode fornecer informações valiosas sobre a demanda de água e os níveis de estresse de uma planta, permitindo estratégias de irrigação mais eficientes e esforços de conservação de água na agricultura (Seeling; Stoner; Linder, 2012).

Não foram observadas variações significativas entre os genótipos não irrigados. Entretanto, as plantas do genótipo MGS Paraíso 2, submetidas ao déficit hídrico, apresentaram uma maior espessura de LIM em comparação com as plantas irrigadas (Tabela 10). As mudanças estruturais na folha, como o aumento da espessura da lâmina foliar, visam melhor retenção e uso da água, manutenção da eficiência fotossintética e oferecimento de resistência estrutural e térmica, o que contribui para a adaptação das plantas às condições ambientais adversas (Baliza *et al.*, 2012). Essas vantagens podem ter favorecido o genótipo MGS Paraíso 2, que apresentou melhor manutenção do potencial hídrico sob 60 dias de restrição hídrica (Tabela 5), destacando a espessura do limbo foliar como um importante critério de seleção em programas de melhoramento para regiões com baixa disponibilidade de água.

Na Tabela 10, para variável espessura da epiderme da face abaxial (EAB) a análise conjunta mostrou efeitos significativos para os tratamentos hídricos e os genótipos. Sob irrigação, as plantas em média, apresentaram maior EAB em relação às não irrigadas.

Tabela 10 – Valores médios da espessura da epiderme abaxial (EAB – μm) avaliados em genótipos de *Coffea arabica* L., após o período seco.

Trat. Hídricos	EAB
Irigado	16,43 a
Sequeiro	15,16 b

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúsculas na linha pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2024).

De acordo com teste de agrupamento, houve a categorização dos genótipos em dois grupos. As plantas dos genótipos 1, 2 e 11 apresentaram maior EAB em relação aos demais (Tabela 11).

A análise conjunta mostrou efeitos significativos da interação para variável EAD, revelando um desempenho diferencial dos genótipos nos tratamentos hídricos estudados. No tratamento sequeiro, em média, houve maior espessamento de EAD quando comparado ao irrigado, destacando-se os cafeeiros 2, 6, 13 e 17, que sob déficit hídrico apresentaram maior EAD quando comparadas com às plantas irrigadas. (Tabela 11).

Tabela 11 – Valores médios da espessura da epiderme da face adaxial (EAD - μm); espessura do parênquima paliçádico (EPP - μm); espessura do parênquima lacunoso (EPL - μm); e espessura da epiderme da face abaxial, (EAB - μm); avaliados em genótipos de *Coffea arabica* L., após o período seco.

Genótipos	EAD		EAB	EPL	EPP	
	I	S			I	S
1 IAC Catuaí SH3	28,67 b A	26,45 c A	16,45 a	233,80 a	46,86 b B	70,81 a A
2 MGS Aranãs	28,56 b B	34,87 a A	17,17 a	232,38 a	60,87 b A	66,11 a A
5 IPR 103	23,98 b A	25,82 c A	15,74 b	224,47 a	54,12 b A	60,15 a A
6 Acauã Novo	27,03 b B	31,74 b A	15,43 b	199,87 a	51,45 b B	71,64 a A
9 Obatã IAC 4739	26,17 b A	28,05 c A	13,78 b	188,71 b	48,52 b A	45,79 b A
10 Arara	26,23 b A	29,05 c A	15,12 b	208,47 a	57,98 b A	60,49 a A
11 MGS Ametista	32,47 a A	30,23 c A	16,93 a	243,29 a	68,57 a A	73,99 a A
13 IAC 125 RN	32,84 a B	37,25 a A	15,87 b	221,71 a	76, 12 a A	46,83 b B
17 MGS Paraíso 2	26,37 b B	35,74 a A	15,66 b	220,03 a	57,98 b A	62,93 a A

Legenda: I: Irrigado; S: Sequeiro.

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúsculas na linha pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2024).

A epiderme adaxial e abaxial desempenham papéis cruciais na tolerância das plantas de café à seca. Estudos realizados por Queiroz-Voltan *et al.* (2014) apontam que as epidermes mais espessas é favorável à tolerância à seca no café. Epidermes mais espessas ajudam a minimizar a perda de água por evaporação, uma característica benéfica em ambientes secos. A camada mais espessa atua como uma barreira física que dificulta a transpiração excessiva, preservando a umidade interna da planta.

Grisi *et al.* (2008), ao caracterizarem duas cultivares de cafeeiro em condições de estresse e não estresse hídrico, também não encontraram diferenças significativas entre as duas epidermes. Por outro lado, Batista *et al.* (2010) observaram diferenças apenas nos valores da epiderme adaxial, especificamente para a cv. Catimor UFV 5390, que apresentou um potencial hídrico mais elevado.

No presente estudo, os genótipos, MGS Aranãs (2), Acauã Novo (6), IAC 125 RN (13) e MGS Paraíso 2 (17), se destacaram por apresentar maior espessura de EAD, possivelmente esta característica pode ter contribuído para manutenção do status hídrico durante a restrição hídrica no período seco nesses genótipos, atuando como uma berreira física evitando a transpiração excessiva no período da seca (Tabela 11).

Na Tabela 11, a espessura do parênquima lacunoso ou esponjoso (EPL), observou-se que houve apenas variação significativa entre os genótipos, e apenas Obatã Amarelo IAC 4739

apresentou menor parênquima lacunoso em relação aos demais. Um aumento na espessura do parênquima esponjoso pode ser benéfico para as plantas quando o fator limitante é o CO₂, já que essa estrutura proporciona um espaço de aeração onde o CO₂ é armazenado para a fotossíntese (Castro; Pereira; Paiva, 2009). Pesquisa realizada por Santos *et al.* (2022a) observou que o genótipo Araponga MG1, que manteve a maior taxa de fotossíntese líquida em condições de Cerrado brasileiro, em comparação com os demais genótipos avaliados, apresentou uma maior espessura do parênquima esponjoso. Essa característica auxiliou na difusão do CO₂ das cavidades subestomáticas.

Foi observada uma interação significativa entre os genótipos e os tratamentos hídricos para o parênquima paliçádico (EPP). Sob irrigação, os genótipos MGS Ametista (11) e IAC 125 RN (13) apresentaram maior EPP em comparação aos demais (Tabela 12).

É importante destacar o desempenho do MGS Ametista (11), que apresentou os maiores valores de espessura do parênquima paliçádico (EPP) e do parênquima esponjoso (EPL) em ambos os tratamentos hídricos. Valores mais elevados desses parênquimas podem proporcionar uma maior capacidade fotossintética aos genótipos que os possuem, beneficiando-os em condições de alta radiação incidente (Ribeiro *et al.*, 2012). Em contrapartida, o Obatã Amarelo IAC 4739 (9) apresentou menores espessuras do parênquima em geral (Tabela 11).

De modo geral, o tratamento de sequeiro resultou em maior espessura do parênquima paliçádico em comparação ao tratamento irrigado durante o período seco. Em condições de déficit hídrico, a maior espessura do parênquima paliçádico, um tecido rico em cloroplastos, favorece a fotossíntese e beneficia o crescimento e desenvolvimento das plantas (Castro, Pereira e Paiva, 2009)

Quanto às características área do floema (AF) e área do xilema (AX), a análise conjunta mostrou diferença estatística significativa apenas para genótipos. Os genótipos IAC Catuaí SH3 (1), MGS Aranãs (2), IPR 103 (5), MGS Ametista (11) e MGS Paraíso 2 (17) mostraram maiores áreas de floema e xilema nos tratamentos hídricos estudados (Tabela 12).

Tabela 12 – Valores médios de área do floema e xilema (AF, AX – μm^2), frequência de vasos do xilema (FVX – vasos/ mm^2), índice de vulnerabilidade (IV), diâmetro (DVX - μm), e condutividade hidráulica relativa (CHR = $r^4 \cdot \text{FVX}$, $\mu\text{m}^4 \cdot 106 \mu\text{m}^4 \cdot 106$) avaliados em genótipos de *Coffea arabica* L. em dois ambientes hídricos (I) irrigado e (S) sequeiro, durante o período seco.

Genótipos	AF	AX	FVX	IV
	1 IAC Catuaí SH3	55806,32 a	52812,05 a	2369,35 a
2 MGS Aranãs	59565,27 a	55612,92 a	2475,85 a	0,0062 a
5 IPR 103	54559,76 a	52196,10 a	2370,19 a	0,0066 a
6 Acauã Novo	48898,72 b	48000,32 a	2554,09 a	0,0064 a
9 Obatã IAC 4739	51893,57 b	47391,39 b	2205,88 b	0,0069 a
10 Arara	46726,33 b	47230,47 b	2268,75 b	0,0068 a
11 MGS Ametista	60478,52 a	56276,32 a	2074,44 b	0,0079 a
13 IAC 125 RN	41398,79 b	33956,07 b	2829,21 a	0,0050 a
17 MGS Paraíso 2	60723,77 a	61371,33 a	1902,01 b	0,0083 a

Genótipos	DVX		CHR	
	I	S	I	S
	1 IAC Catuaí SH3	16,80 a A	15,26 a A	9,37 a A
2 MGS Aranãs	15,23 b A	14,18 a A	8,65 a A	6,08 b A
5 IPR 103	13,82 b A	15,07 a A	5,95 a A	6,80 b A
6 Acauã Novo	14,18 b A	15,86 a A	5,99 a B	11,18 a A
9 Obatã IAC 4739	16,34 a A	15,24 a A	9,72 a A	4,65 b B
10 Arara	15,13 b A	14,60 a A	8,61 a A	5,62 b A
11 MGS Ametista	15,87 a A	15,46 a A	7,97 a A	7,93 b A
13 IAC 125 RN	16,08 a A	13,70 a B	10,68 a A	8,97 a A
17 MGS Paraíso 2	16,67 a A	16,62 a A	6,35 a B	10,89 a A

Legenda: I: Irrigado; S: Sequeiro.

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúsculas na linha pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2024).

Plantas com maior área do floema podem demonstrar maior translocação de fotoassimilados, visto que, o floema é um tecido especializado no transporte de fotoassimilados, que são componentes do metabolismo da planta (Castro; Pereira; Paiva, 2009). Já o aumento na área do xilema pode permitir uma maior capacidade de transporte de água, garantindo que a planta tenha acesso suficiente à água mesmo durante períodos de estresse (Ramachandran *et al.*, 2020).

O índice de vulnerabilidade pra embolia (IV), não apresentou diferenças estatísticas significativas entre os genótipos avaliados (Tabela 12).

Em relação ao diâmetro de vasos do xilema (DVX), houve interação significativa entre os genótipos e os tratamentos hídricos estudados. Sob irrigação, os cafeeiros apresentaram variabilidade entre si. No sequeiro, não foi observada essa variabilidade entre genótipos (Tabela 12).

Esta variação genética evidenciada sob irrigação, pode estar atrelada a responsividade dos genótipos à irrigação. Diferentes genótipos de cafeeiros apresentam variações genéticas que influenciam a maneira como respondem à irrigação. Alguns genótipos podem mostrar um aumento significativo no crescimento e na produção de café quando irrigados, enquanto outros podem ser menos responsivos à irrigação (Silva *et al.*, 2010e).

Os genótipos IAC Catuaí SH3 (1) e MGS Ametista (11) apresentaram maior DVX em ambos tratamentos hídricos (Tabela 12). A presença de vasos de maior diâmetro em ambas as condições sugere que os genótipos possuem uma capacidade consistente de desempenho nos dois tratamentos hídricos, o que é uma característica valorizada na produção agrícola. Isso pode favorecer a manutenção do crescimento e produtividade independentemente das variações na disponibilidade de água (Choat *et al.*, 2012).

Sob condições de sequeiro, muitas plantas desenvolvem uma menor DVX, como foi notado nas plantas do genótipo IAC 125 RN (13) (Tabela 12), o que demonstra uma estratégia para reduzir a perda de água e aumentar a eficiência do uso da água. Plantas com menor DVX podem ser mais eficientes no uso da água, mantendo um equilíbrio hídrico mais estável em condições de seca (DaMatta *et al.*, 2007). Essa adaptação pode explicar a diferenciação do genótipo, IAC 125 RN (13), que apresentou melhor eficiência no uso da água (EUA) mesmo com uma menor DVX, em comparação com a Obatã Amarelo IAC 4739 (9), que exibiu menor EUA e menor taxa fotossintética sob deficiência hídrica, (Tabelas 5 e 12).

A frequência dos vasos do xilema (FVX), afeta a eficiência do transporte de água e nutrientes através do xilema, influenciando diretamente a capacidade da planta de lidar com o estresse hídrico e outras condições adversas. Quanto maior a frequência de vasos do xilema, maior é a densidade de vasos e, em geral, maior é a capacidade de transporte de água da planta (Aguiar Júnior, 2023).

Nesse estudo, não houve diferença estatística para os tratamentos hídricos estudados, apenas variabilidade entre os genótipos. Houve o agrupamento pelo teste Scott-Knott em dois grupos, sendo as cultivares com maior FVX foram: IAC Catuaí SH3 (1), MGS Aranãs (2), IPR 103 (5), Acauã Novo (6) e IAC 125 RN (13). Ao analisar o genótipo IAC 125 RN (13) observou-se uma maior frequência de vasos do xilema (FVX) associada a um menor diâmetro dos vasos

do xilema (DVX) em sequeiro, o que resulta em um índice de vulnerabilidade (IV) menor quando comparado com as demais. Isso sugere menores chances de embolia em períodos de estiagem (Tabela 12).

Na análise da condutividade hidráulica relativa (CHR) (Tabela 12), observou-se uma interação significativa entre os genótipos e os tratamentos hídricos. Não houve diferença entre os genótipos sob irrigação. No entanto, sob condições de déficit hídrico, destacaram-se as cultivares Acauã Novo (6), IAC 125 RN (13) e MGS Paraíso 2 (17), que apresentaram maiores valores de CHR. Além disso, as cultivares Acauã Novo e MGS Paraíso 2, quando não irrigadas, mostraram uma CHR superior àquelas mantidas sob irrigação, indicando uma maior capacidade de transporte de água sob déficit hídrico. Além disso, esses genótipos se destacaram com maior incremento nas características agrônômicas avaliadas (Tabela 3), tal característica pode ter contribuído para uma melhor manutenção do status hídrico da parte aérea da planta, favorecendo as trocas gasosas e consequentemente maior crescimento da parte aérea (Freitas *et al.*, 2000).

Para as variáveis DEN e a DPDE, a análise conjunta não mostrou efeitos significativos para a interação entre os fatores. Foi verificada apenas diferenças significativas entre genótipos para DEN. A densidade estomática foi maior nos cafeeiros IPR 103, Obatã Amarelo IAC 4739 e Arara (Tabela 13).

Tabela 13 – Valores médios de densidade estomática (DEN - número de estômatos mm²) e relação entre diâmetro polar e equatorial de estômatos (DPDE) avaliados em genótipos de *Coffea arabica* L, após o período seco.

Genótipos	DEN	DPDE
1 IAC Catuaí SH3	158,92 b	1,58 a
2 MGS Aranãs	157,63 b	1,63 a
5 IPR 103	196,44 a	1,59 a
6 Acauã Novo	142,91 b	1,58 a
9 Obatã IAC 4739	184,85 a	1,59 a
10 Arara	183,56 a	1,51 a
11 MGS Ametista	144,20 b	1,55 a
13 IAC 125 RN	159,95 b	1,52 a
17 MGS Paraíso 2	156,34 b	1,53 a

Legenda: I: Irrigado; S: Sequeiro.

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúsculas na linha pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância

Fonte: Da autora (2024).

Dentre os genótipos que se destacaram por apresentar maior DEN, a cultivar Arara (10) possivelmente investiu na estratégia de aumentar a DEN, associada a menor condutância estomática (gs), conseqüentemente garantindo melhor eficiência hídrica, equilibrando a entrada de CO₂ com a perda de água, refletindo numa melhor taxa fotossintética (A) e EUA. Enquanto, os cafeeiros IPR 103 (5) e Obatã Amarelo IAC 4739 (9) apresentaram maior DEN, associada a menor EUA. Isso pode ter relação com menor controle estomático (Tabelas 5 e 13).

Estudos realizados por Batista *et al.* (2010) com *Coffea arabica* revelaram várias adaptações anatômicas e fisiológicas, entre elas a maior densidade estomática, cutículas mais espessas e maior proporção de parênquima paliçádico foram associados à melhor tolerância à seca em algumas cultivares. Melo *et al.* (2014) observaram maiores valores da densidade estomática e as razões dos diâmetros polar e equatorial na plantas sob estresse hídrico, essas características com outras modificações anatômicas na cultivar Siriema contribuíram para sua tolerância à seca.

Nossos resultados demonstram que alta densidade estomática (DEN) nem sempre confere maior tolerância ao estresse hídrico, comportamento especialmente observado nos genótipos IPR 103 (5) e Obatã A. IAC 4739 (9). Em um estudo revisado, foi discutido como a densidade estomática pode afetar a eficiência do uso da água e a resistência ao estresse osmótico em plantas. Plantas com maior densidade estomática podem apresentar maiores taxas de transpiração, o que pode ser benéfico para a dissipação de calor, mas também pode aumentar a perda de água, complicando a manutenção do balanço hídrico (Hasanuzzaman, Zhou, Shabala, 2023).

Nesse contexto, a redução de densidade estomática (DEN) observada nos genótipos Acauã Novo (6) e IAC 125 RN (13) favoreceu o balanço hídrico em folhas recém-desenvolvidas sob déficit hídrico no período seco, demonstrando possivelmente uma adaptação ao estresse. Essa adaptação permite que as plantas reduzam a perda de água e otimizem a eficiência do uso da água (EUA). Além disso, o maior espessamento de cutícula na face adaxial pode ter contribuído para minimizar a perda de água através da cutícula (Hasanuzzaman, Zhou, Shabala, 2023; Raven, 2014) (Tabelas 5 e 13).

Na Tabela 13, quanto à relação diâmetro polar e diâmetro equatorial (DPDE), não houve diferença estatística.

Estudos realizados por Grisi *et al.* (2008), características anatômicas como diâmetros polar e equatorial, a relação DPDE e a densidade estomática permitiram discriminar satisfatoriamente os genótipos de café em relação à tolerância diferencial, favorecendo o cv

Siriema (tolerante à seca) em comparação com a Catuaí. No entanto, neste presente trabalho, essas características anatômicas não foram determinantes para caracterizar os genótipos quanto à tolerância diferencial à deficiência hídrica.

4.2.2 Dispersão das cultivares avaliadas e correlação entre as características fisiológicas, anatômicas e morfológicas.

Na Tabela 14 está apresentada as correlações das características fisiológicas, anatômicas e agronômicas com os dois primeiros componentes principais.

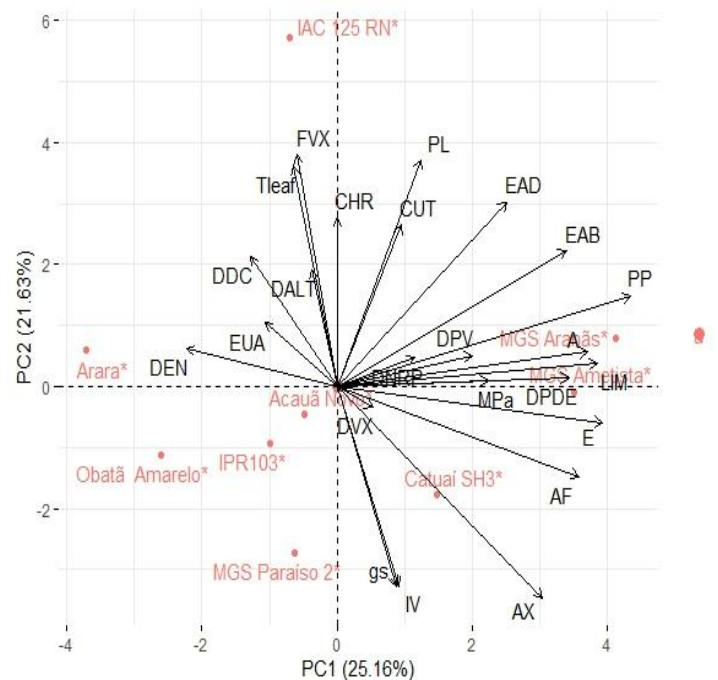
Tabela 14 – Correlação das variáveis fisiológicas, anatômicas e agronômicas, com as duas primeiras componentes principais de cultivares de *Coffea arabica* L. em sistema cultivo de sequeiro e irrigado após a imposição do déficit hídrico.

Variáveis	Sequeiro		Irrigado	
	PC1	PC2	PC1	PC2
DEN	-0,3480	-0,5960	-0,4652	0,1284
DPDE	-0,2191	-0,7130	0,7187	0,0310
EAD	-0,3433	0,7678	0,5247	0,6312
EAB	0,7967	0,4075	0,7097	0,4655
PL	0,7975	0,0721	0,2616	0,7753
PP	0,6552	-0,1348	0,9104	0,3113
CUT	-0,0734	0,2816	0,2003	0,5531
LIM	0,6182	0,1791	0,8065	0,0795
AF	0,8679	-0,2903	0,7490	-0,3086
AX	0,6913	-0,2855	0,6365	-0,7241
FVX	-0,2751	0,6023	-0,1245	0,7928
DVX	0,8214	0,2186	0,1108	-0,0712
IV	0,6963	-0,4819	0,1897	-0,6851
CHR	0,3777	0,7399	0,0002	0,5775
MPa	0,2010	0,3135	0,4673	0,0199
A	0,0375	0,8499	0,7747	0,1177
gs	0,4497	0,4035	0,1824	-0,6836
E	0,5030	0,4933	0,8233	-0,1232
Tleaf	-0,6862	0,1593	-0,1333	0,7545
DPV	-0,6321	0,2528	0,4186	0,1071
EUA	-0,5369	0,2802	-0,2230	0,2182
DALT	0,2643	0,5428	-0,0770	0,3989
DDC	-0,6007	0,5547	-0,2687	0,4447
DNRP	0,2843	0,3255	0,2405	0,0980

Fonte: Da autora (2024).

Na figura 2, na condição irrigada a análise de componentes principais explicou 46,79% da variabilidade total dos dados. O primeiro componente principal (PC1) explicou 25,16% da variabilidade total, e as variáveis de maior peso foram PP, E, LIM, A e AF. O segundo componente principal explicou 21,63% da variabilidade total dos dados, e as variáveis de maior peso foram FVX, PL, Tleaf, AX e IV.

Figura 2 – Projeção de vetores e dispersão das cultivares de *Coffea arabica* L., em relação aos dois primeiros componentes principais em ambiente irrigado.



Legenda: Variáveis fisiológicas: Taxa fotossintética líquida (A), eficiência instantânea no uso da água (EUA), condutância estomática (gs), déficit de pressão de vapor (DPV), taxa transpiratória (E), temperatura foliar (Tleaf) e potencial hídrico na antemanhã (MPa). Variáveis anatômicas foliares: limbo foliar (LIM), cutícula da face adaxial (CUT), espessura do parênquima paliçádico (PP), espessura do parênquima lacunoso (PL), espessura da epiderme adaxial (EAD), espessura da epiderme abaxial (EAB), densidade estomática (DEN), relação entre diâmetro polar e equatorial (DP/DE), área do floema (AF), área do xilema (AX), diâmetro dos vasos do xilema (DVX), frequência de vasos do xilema (FVX), índice de vulnerabilidade (IV) condutividade hidráulica relativa (CHR). Variáveis agronômicas: incremento do diâmetro de caule (DDC), incremento da altura da planta (DALT) e incremento do número de ramos plagiotrópicos (DNRP).

Fonte: Da autora (2024).

Sob irrigação, os genótipos MGS Aranãs e MGS Ametista se diferenciaram dos demais pelas características de LIM, EAD, EAB, PP, DPDE e A, demonstrando uma adaptação superior à condição irrigada em relação aos demais. Já as plantas do genótipo Arara quando irrigadas exibiram maior valores de DEN, EUA e menor A, LIM e E (Figura 2).

O genótipo IAC Catuaí SH3 se alocou mais próximo de AX, DVX, gs e IV. Os cafeeiros Obatã Amarelo e IPR 103 apresentaram menor correlação com A e EAD, e maiores valores de DEN e gs. No entanto, IPR 103 teve menor incremento de DDC e DALT em sistema de cultivo irrigado (Figura 2).

O genótipo IAC 125 RN apresentou dispersão isolada dos demais, sendo observados, maiores valores de CHR, FVX, CUT, DDC, DALT, PL, EAD e Tleaf e menores valores de IV, AX e AF. E o genótipo Acauã Novo, apresentou comportamento intermediário em comparação aos demais agrupamentos, apontando que dentre as variáveis analisadas, nenhuma característica específica contribuiu para sua dispersão (Figura 2).

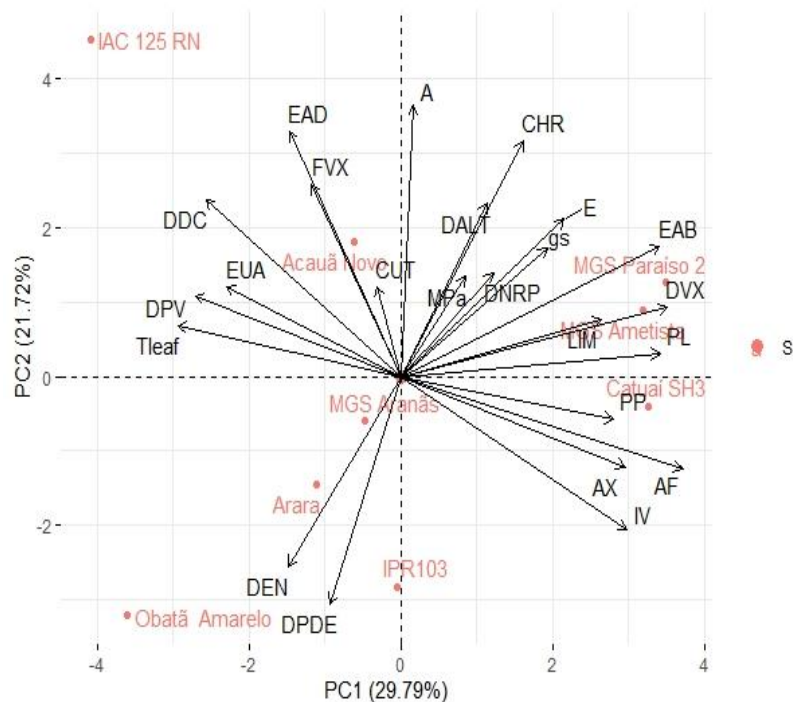
Portanto, sob irrigação, a capacidade de realizar fotossíntese e transpiração é priorizada pelos genótipos, sendo que as variáveis A, E, MPa e NRPA x E estão altamente correlacionadas positivamente.

Na Figura 2, sob fornecimento de água observa-se também, a correlação positiva entre as características FVX x DALT x AX. Uma alta frequência de vasos do xilema está geralmente associada a uma maior área total do xilema, facilitando o transporte eficiente de água e nutrientes, promovendo o crescimento (Brodersen *et al.*, 2010).

Por outro lado, correlações negativas também foram observadas como: E x EUA e Tleaf e IV. A eficiência do uso da água (EUA) correlacionou-se negativamente com E, indicando que os genótipos que transpiram mais podem apresentar menor EUA. Em condições irrigadas, uma menor temperatura foliar pode indicar menor estresse térmico devido às condições favoráveis de disponibilidade de água.

Em sistema de cultivo de sequeiro (Figura 3), as duas principais componentes explicaram 51,51% da variabilidade total dos dados. O primeiro componente (PC1) explicou 29,79% da variabilidade total, sendo que as variáveis com maior peso foram AF, DVX, PL, EAB e IV. O segundo componente (PC2) explicou 21,72% da variabilidade, com as variáveis A, EAD, CHR, DPDE e FVX.

Figura 3 – Projeção de vetores e dispersão das cultivares de *Coffea arabica* L., em relação aos dois primeiros componentes principais em ambiente sequeiro após a imposição do déficit hídrico.



Legenda: Variáveis fisiológicas: Taxa fotossintética líquida (A), eficiência instantânea no uso da água (EUA), condutância estomática (gs), déficit de pressão de vapor (DPV), taxa transpiratória (E), temperatura foliar (Tleaf) e potencial hídrico na antemanhã (MPa). Variáveis anatômicas foliares: limbo foliar (LIM), cutícula da face adaxial (CUT), espessura do parênquima paliçádico (PP), espessura do parênquima lacunoso (PL), espessura da epiderme adaxial (EAD), espessura da epiderme abaxial (EAB), densidade estomática (DEN), relação entre diâmetro polar e equatorial (DP/DE), área do floema (AF), área do xilema (AX), diâmetro dos vasos do xilema (DVX), frequência de vasos do xilema (FVX), índice de vulnerabilidade (IV) condutividade hidráulica relativa (CHR). Variáveis agrônômicas: incremento do diâmetro de caule (DDC), incremento da altura da planta (DALT) e incremento do número de ramos plagiotrópicos (DNRP).

Fonte: Da autora (2024).

Sob restrição hídrica durante o período seco, o agrupamento dos genótipos MGS Paraíso 2, MGS Ametista e IAC Catuaí SH3 se destacou dos demais por apresentar os maiores valores de DVX, gs, E, AF, AX, PL, DNRP e IV, associado a valores intermediários de A. MGS Paraíso 2 se destacou por apresentar maiores valores de CHR e MPa (Figura 3).

No sequeiro, o genótipo IAC 125 RN apresentou dispersão isolada dos demais, sendo observados, maiores valores de CHR, FVX, CUT, DDC, DALT, PL, EAD e Tleaf e menores valores de IV, AX e AF. Verificou-se aumento da CHR associada com FVX nas cultivares IAC 125 RN e Acauã Novo, e com correlação negativa com IV, AX e AF (Figura 3).

Em sequeiro, maiores valores das variáveis DEN e DPDE, bem como menores valores médios de CHR, A e E contribuíram para dispersão dos genótipos Obatã Amarelo IAC 4739,

Arara e IPR 103. O genótipo MGS Aranãs apresentou comportamento intermediário em comparação aos demais agrupamentos, apontando que dentre as variáveis analisadas, nenhuma característica específica contribuiu para sua dispersão (Figura 3).

Em condições de sequeiro, os genótipos mostraram adaptações estruturais e fisiológicas que contribuíram para tolerância ao déficit hídrico. Na Figura 3, foi observada correlações positiva entre as características como CHR x FVX. De forma indireta, quando há maior FVX, presume-se que também haja menor DVX, o que ajuda a proteger o xilema da cavitação, moderando o movimento da água na parte aérea e ajuda a manter uma rizosfera úmida para o crescimento contínuo das raízes e a absorção de água e nutrientes (Ramachandran *et al.*, 2018).

Na Figura 3, é possível observar outras correlações positivas que foram vantajosas para os genótipos tolerarem o déficit hídrico e manter maior teor de água nas folhas e maior taxa fotossintética, como os ganhos de espessura da epiderme adaxial e cutícula.

Embora a condutância estomática regule significativamente a transpiração foliar em condições normais, a água também pode ser perdida da superfície foliar contornando os estômatos através de um processo conhecido como transpiração cuticular residual. Reduzir a transpiração cuticular, ou residual, é essencial para a aptidão e a sobrevivência das plantas em condições de déficit hídrico. A deposição de cera cuticular na epiderme das folhas funciona como uma barreira que limita essa transpiração residual, ajudando a planta a conservar água (Hasanuzzaman, Zhou, Shabala, 2023)

Além da correlação entre CHR, EUA e A, promovendo maior incremento de altura e diâmetro de caule nos cafeeiros mesmo sob restrição hídrica (Figura 3).

A partir dos resultados, foi possível concluir que os genótipos MGS Ametista, MGS Paraíso 2, IAC 125 RN, MGS Aranãs. IAC Catuaí SH3 e Acauã Novo destacaram-se por apresentar características anatômicas e fisiológicas que favorecem a tolerância a condições de seca. Estas incluem maior espessura do parênquima paliçádico e epiderme adaxial, maior frequência de vasos de xilema, e uma maior condutividade hidráulica relativa, o que resulta em uma maior eficiência no uso da água. Isso, por sua vez, pode ter contribuído para a manutenção do status hídrico e da taxa fotossintética, refletindo em um aumento significativo no crescimento das plantas sob condições de seca, sendo portanto considerados promissores para o programa de melhoramento genético visando tolerância à seca.

Os genótipos Arara e IPR 103 mostraram correlações intermediárias envolvendo os mecanismos de adaptação sob estresse hídrico, enquanto a cultivar Obatã Amarelo IAC 4739

apresentou uma baixa eficiência em seus mecanismos anatômicos adaptativos e fisiológicos, mostrando-se mais propensa à deficiência hídrica.

4.2.2.1 Perfil diferencial da expressão gênica em *Coffea arabica* sob déficit hídrico.

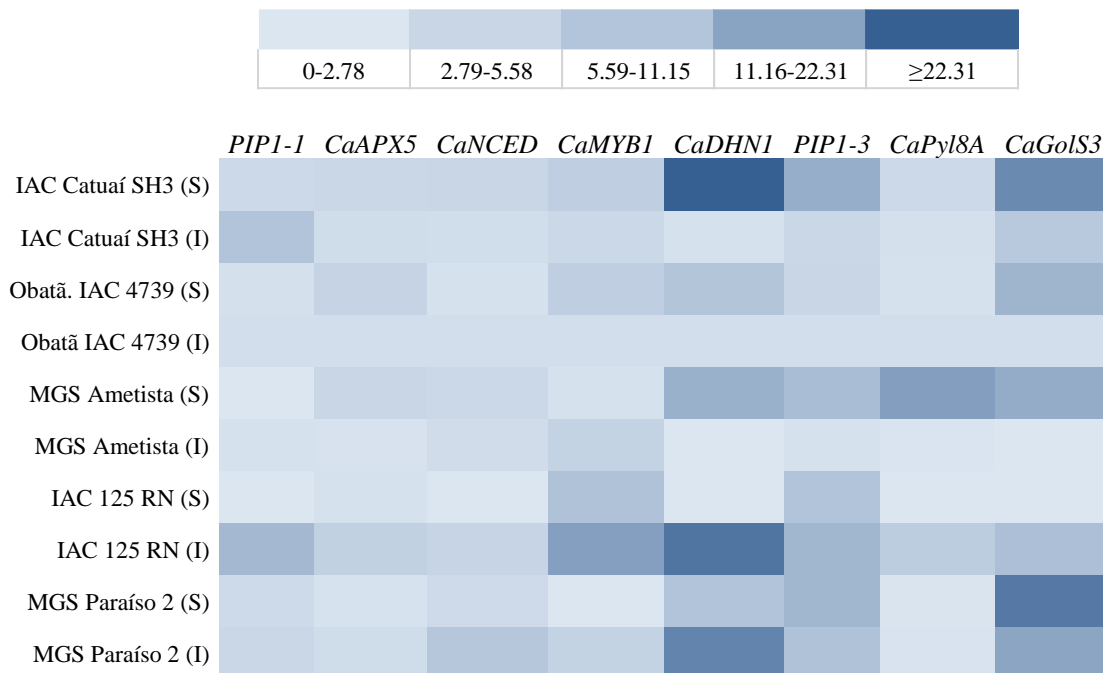
Neste presente estudo, foi avaliada a expressão gênica diferencial em cinco genótipos entre eles IAC Catuaí SH3, MGS Ametista, MGS Paraíso, IAC 125 RN e Obatã IAC 4739, com respostas contrastantes de potencial hídrico e fotossíntese aos 60 dias sob restrição hídrica.

Os cafeeiros irrigados apresentaram fotossíntese até 7,35 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}$. Ao analisar os cafeeiros sob restrição hídrica, observou-se que a taxa fotossintética foi inferior quando comparadas ao irrigado, com exceção da cv. IAC 125 RN (4S) que se destacou por apresentar maior manutenção da fotossíntese 7,41 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}$. Já a cv. Obatã IAC 4739 (2), destacou-se por apresentar menor fotossíntese nos dois regimes hídricos em torno de 3,95 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2/\text{s}$ (Tabela 5).

As cultivares de café em sistema irrigado apresentaram potencial hídrico até -0,7 MPa. Ao analisar as cultivares em sistema sequeiro, observou-se que os potenciais foram menores quando comparados ao irrigado em torno de -1,8 MPa. Destaque-se em sequeiro, a cultivar MGS Paraíso 2 (5S) com maior manutenção do status hídrico -0,98 MPa (Tabela 5).

As análises de qPCR dos genes testados, responsivos ao estresse hídrico, em grande parte, foi observada expressão diferencial, principalmente entre os tratamentos controle e não irrigados (Figura 4).

Figura 4 – Heat map representando valores médios de expressão diferencial de genes alvo em cinco cultivares de *Coffea arabica* L., aos 60 dias de estresse hídrico em condições de campo.



Legenda: Relação das cultivares: IAC Catuaí SH3 (1), Obatã Amarelo IAC 4739 (2), MGS Ametista (3), IAC 125 RN (4) e MGS Paraíso 2 (5). Em duas condições hídricas I - irrigado e S - sequeiro durante período seco, determinada pela quantitativa PCR em tempo real.

Fonte: Da autora (2024).

A análise dos perfis de expressão gênica em *Coffea arabica* sob condições de déficit hídrico revelou variações significativas na regulação dos genes candidatos (GCs) entre as diferentes cultivares. Os resultados destacam a complexidade dos mecanismos de resposta ao estresse hídrico e a diversidade das estratégias moleculares adotadas pelas plantas para mitigar os efeitos adversos desse estresse.

Nos resultados de qPCR existem vários fatores que interferem nas respostas de expressão dos genes candidatos, como por exemplo, à limitação hídrica e as cultivares. Assim decidimos discutir os resultados em partes separadas.

a) Efeito da deficiência hídrica sobre a expressão dos GCs

As análises dos perfis de expressão gênica dos genes candidatos (GCs) mostraram que o déficit hídrico afeta a expressão dos genes em *Coffea arabica* (Figura 4).

Na Figura 5, foi possível verificar que a expressão dos genes aumentou com o estresse hídrico, destacando-se os genes *PIP 1:3*, *CaGols3*, *CaAPX5* e *CaDHN1*, que tiveram suas expressões reguladas positivamente mais evidenciadas sob limitação hídrica, seguidos de

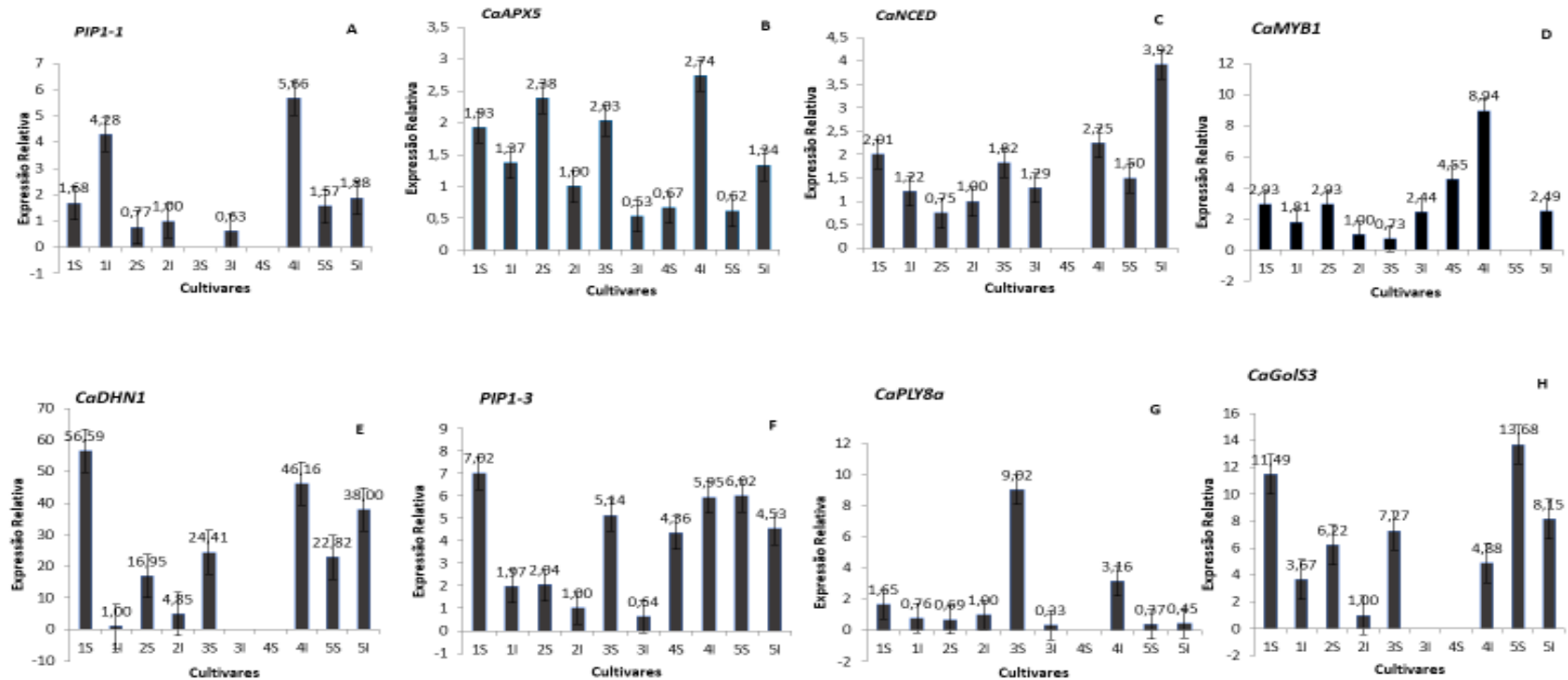
CaMYB1, *CaPYL8a* e *CaNCED*, que apresentaram expressão gênica relativa mais reduzidas. A expressão diferencial desses genes, entre os materiais genéticos testados, indica que diferentes mecanismos podem estar associados à tolerância à seca em *Coffea arabica*.

Dentre os genes que tiveram expressão gênica mais evidenciadas, o gene *PIP 1:3* mostrou regulação positiva em condições de déficit hídrico em todas as cultivares, com maior expressão observada nas cultivares IAC Catuaí SH3 e MGS Paraíso 2, que apresentaram maior potencial hídrico foliar. A regulação positiva de *PIP 1:3* sugere uma adaptação para a melhorar a eficiência do transporte de água, essencial para a manutenção do turgor celular e a redução do déficit hídrico (Figura 5).

As cultivares IAC Catuaí SH3 e MGS Paraíso 2 que apresentaram maior potencial hídrico foliar durante o déficit hídrico, também exibiram maiores níveis de expressão do gene *PIP 1:3*. A maior expressão de *PIP 1:3* em condições de déficit hídrico pode ser uma estratégia adaptativa das plantas para melhorar a eficiência do transporte de água sob estresse. Em contraste, a cultivar Obatã IAC 4739, caracterizada anteriormente por ser sensível à limitação hídrica, devido ao menor potencial hídrico e à menor taxa fotossintética, apresentou uma diminuição na expressão de *PIP 1:3* nas folhas (Figura 5 F).

Uma série de estudos explorou o papel das aquaporinas em plantas de café sob condições de déficit hídrico. Santos e Mazzafera *et al.* (2013) descobriu que a expressão das aquaporinas *PIP2:1* e *PIP2:2* aumentou em resposta ao déficit hídrico em plantas de café, particularmente nas raízes e sua regulação positiva auxiliou na recuperação pós-estresse dos cafeeiros. Isso sugere um papel potencial na regulação da absorção de água durante à seca. Da mesma forma, Miniussi *et al.* (2015) identificou nove aquaporinas em *Coffea arabica* e observou mudanças em seus níveis de expressão em resposta ao estresse hídrico, indicando seu envolvimento na hidráulica da planta e no balanço hídrico.

Figura 5 – Expressão de genes diferencialmente expressos em folha de cultivares de *C. arabica* em campo sob duas condições hídricas durante período seco na região do Cerrado Mineiro.



Fonte: Cultivares: IAC Catuaí SH3 (1), Obatã Amarelo IAC 4739 (2), MGS Ametista (3), IAC 125 RN (4) e MGS Paraíso 2 (5). em sistema irrigado (I) e sequeiro (S). A abundância dos transcritos foi normalizada usando a expressão do gene *CaUBQ10* como um controle endógeno. Os resultados foram expressos usando 2I (cv. sensível) como calibrador (Expressão relativa =1). Valores de três replicatas técnicas foram apresentados como médias \pm SE (barras).

Fonte: Da autora (2024).

Neste estudo, o gene *PIP 1:3* mostrou-se regulação positiva da expressão gênica em *Coffea arabica* sob déficit hídrico em condições de campo. No entanto, os estudos com esse gene em *Coffea* ainda são incipientes em *Coffea arabica*, indicando a necessidade de mais pesquisas para entender melhor seu papel em resposta ao déficit hídrico. Pois há grande variação nas respostas das isoformas de aquaporinas ao estresse induzido pela seca, alguns autores relatam que a ativação/repressão desses genes pode ser modificada pela intensidade e duração do estresse (Bogeat-Triboulot *et al.* 2007; Galmes *et al.* 2007).

Para a aquaporina isomorfa *PIP 1:1* (Figura 5A), foram observados níveis de expressão mais baixos sob déficit hídrico em comparação com *PIP 1:3*. Os cafeeiros irrigados mostraram elevada expressão gênica de *PIP 1:1*, possivelmente devido à regulação positiva em condições de alta disponibilidade de água. Todas as cultivares aumentaram a expressão de *PIP 1:1*, especialmente as cultivares IAC 125 RN (4I) e IAC Catuaí SH3 (1I), mas houve regulação negativa desse gene em condições de seca. Esse fenômeno pode ser atribuído ao estresse hídrico, que induz uma regulação negativa da expressão de aquaporinas.

Estudos mostraram que os níveis de expressão de PIP, os genes são afetados negativamente pela escassez de água, devido a grande variação de isomorfias de aquaporinas (Alexandersson *et al.* 2005, Aroca; Porcel; Ruiz-Lozano, 2012). Por exemplo, a superexpressão de *PIP1:1* em *Arabidopsis* piorou o desempenho das plantas em condições de estresse hídrico (Jang *et al.*, 2007). Pesquisas realizadas por Yaguinuma *et al.* (2021) observaram que a expressão do gene *PIP 1:1* diminuiu em *Coffea canephora* tolerante à seca sob déficit hídrico. Além disso, o aumento do ácido abscísico (ABA), um hormônio crucial no fechamento dos estômatos, possivelmente contribuiu para a diminuição na expressão de *PIP 1:1* (Jang *et al.*, 2004).

No sequeiro, os maiores níveis de expressão relativa de *CaAPX5* (Figura 5B), foram observados na cultivar Obatã Amarelo IAC 4739 (2S), seguida por MGS Ametista (3S), IAC Catuaí SH3 (1S), IAC 125 RN (4S) e MGS Paraíso 2 (5S). Pesquisas demonstraram que em condições de déficit hídrico, a expressão de *CaAPX5* foi regulada positivamente em progênies de café arábica com maior eficiência fotoquímica, contribuindo para a eficiência da fotossíntese em progênies tolerantes à seca (Santos *et al.*, 2021b). Resultados semelhantes também foram encontrados por Merga e Beksisa (2023), na qual observaram que *CaAPX5* contribuiu para a eficiência da fotossíntese em café arábica tolerante à seca. Nesse estudo, houve expressão de *CaAPX5* positivamente regulada pela seca, o que implica em uma maior tolerância ao estresse oxidativo.

Sob restrição hídrica, os cafeeiros Obatã IAC 4739 e MGS Ametista apresentaram os menores valores de potencial hídrico (Tabela 5). Sob condições de déficit hídrico, as plantas produzem espécies reativas de oxigênio (EROs), como peróxido de hidrogênio (H_2O_2), como subprodutos do metabolismo celular. A APX catalisa a conversão do H_2O_2 em água e oxigênio utilizando ascorbato como doador de elétrons. Isso ajuda a prevenir o acúmulo de H_2O_2 , que pode ser tóxico para as células vegetais. Possivelmente, o aumento da atividade de *CaAPX5*, pode ser mais uma consequência do estresse oxidativo ocasionado pelo déficit hídrico do que um mecanismo de tolerância (Santos *et al.*, 2019d; Silva *et al.*, 2018e).

Ramalho *et al.* (2018) investigaram os efeitos da exposição única e combinada ao estresse por seca e frio nas cultivares de *C. arabica* cv. Icatu, *C. canephora* cv. Apotã e no híbrido de *C. arabica* cv. Obatã. No aspecto fisiológico, a cultivar Icatu mostrou menor impacto na presença de estresse por frio e seca, caracterizado pela redução da lipoperoxidação sob interação de estresses. Em nível molecular, a exposição simultânea de Icatu aos dois estresses aumentou a expressão de genes que codificam a ascorbato peroxidase (APX), responsável pela remoção de H_2O_2 , resultando em maior atividade enzimática total de APX. Em menor grau, esse padrão também foi observado em *C. canephora*, enquanto Obatã foi o genótipo menos responsivo considerando os genes estudados.

O gene *CaDHNI* (dehidrina) foi superexpresso na cv. IAC Catuaí SH3 (1S), seguida da MGS Ametista (3S) sob restrição hídrica (Figura 5E). As dehidrinas são conhecidas como um grupo II de proteínas LEA (embriogênese tardia abundante), que se acumulam nos estágios posteriores em resposta aos estresses ambientais como seca, frio e salinidade (Yu; Wang; Zhang, 2018). Elas ajudam a estabilizar as membranas celulares durante períodos de desidratação, prevenindo danos irreversíveis e, auxiliando na proteção do DNA e RNA contra danos oxidativos (Rorat, 2006). Estudos têm demonstrado que clones *Coffea canephora* tolerantes ao estresse tendem a expressar níveis mais altos de dehidrinas em comparação com clones suscetíveis. (Costa, 2014; Vieira *et al.*, 2013).

A expressão de *CaGols3* foi detectada em níveis mais elevados nas cultivares MGS Paraíso 2 (5S), MGS Ametista (3S), e IAC Catuaí SH3 (1S). Estudos têm demonstrado que o aumento da expressão do gene *CaGols3* em plantas de café está associado a um aumento na concentração de galactinol e rafinose nas células (Santos *et al.*, 2011f). Esses açúcares solúveis atuam como osmólitos compatíveis, ajudando a manter o equilíbrio osmótico das células sob condições de seca e reduzindo o potencial de desidratação celular (Santos *et al.*, 2021b). Além disso, o *CaGols3* contribui para a eficiência da fotossíntese em *Coffea arabica* tolerante à seca

(Merga; Beksisa, 2023). Nesse sentido, os maiores níveis de expressão de *CaGolS3* nas cultivares em estudo podem ter contribuído para a proteção do aparelho fotossintético contra danos oxidativos causados pelo estresse hídrico.

O gene *CaMYB1* é fator chave que integra sinais ABA e auxina na modulação da homeostase da auxina durante o desenvolvimento da raiz lateral e movimentação dos estômatos, particularmente sob condições de déficit hídrico (Baldoni *et al.*, 2015; Cao *et al.*, 2020).

Na Figura 5D, é possível observar que houve regulação positiva em condições de déficit hídrico, nas cultivares IAC Catuaí SH3 (1S), Obatã IAC 4739 (2S) e em IAC 125 RN (4S) e negativa para cv. Ametista (3S), que exibiu uma expressão gênica relativa reduzida sob estresse hídrica. A maior expressão de *CaMYB1*, pode promover o desenvolvimento de raízes mais profundas e ramificadas, melhorando a capacidade da planta de acessar água em camadas mais profundas do solo. Cafeeiros com raízes bem desenvolvidas na fase inicial de crescimento no campo, podem influenciar significativamente a capacidade da planta de adquirir recursos e resistir a estresses ambientais (Lynch, 2007).

Quanto a expressão do gene *CaPYL8a*, as cultivares apresentaram perfis de expressão com níveis mais reduzidos, o que pode estar relacionada a regulação diferencial de ABA nas cultivares analisadas. Pesquisas realizadas por Santos *et al.* (2021b) e Santos *et al.* (2019d) mostraram que diferentes genótipos de café arábica apresentam padrões de expressão variados de *CaPYL8a* sob estresse hídrico, com alguns genótipos mostrando expressão reduzida em resposta ao déficit hídrico. Cotta (2016) também investigou os perfis de expressão dos genes que codificam as proteínas PYL, em folhas e raízes de clones tolerantes (14, 73 e 120) e sensível (22) de *C. canephora* submetidos à seca. Nas folhas, a seca resultou em uma regulação negativa da expressão dos genes *CcPYR1*, *CcPYL2* e *CcPYL4*, que codificam receptores de ABA. Por outro lado, o gene *CcPYL8b* foi altamente expresso em raízes sob estresse hídrico, especialmente nos clones tolerantes 73 e 120.

Destaca-se, porém a superexpressão desse gene na cultivar MGS Ametista (3S) sob déficit hídrico (Figura 5 G). Estudos destacaram o envolvimento das vias de sinalização de ABA em resposta ao estresse hídrico, com genes que codificam receptores ABA, como *CaPYL8a*, mostrando altos níveis de expressão sob limitação de água (Fernandes *et al.*, 2021).

Para expressão de *CaNCED* (Figura 5C), foi observada regulação positiva sob déficit hídrico em plantas das cultivares IAC Catuaí SH3 (1S), MGS Ametista (3S) e MGS Paraíso 2 (5S). A *NCED* (9-cis-epoxicarotenoide dioxigenase), é uma enzima chave na via biossintética do ácido abscísico (ABA), um hormônio vegetal fundamental para a regulação da resposta ao

estresse hídrico, catalisa uma etapa limitante na síntese de ABA a partir de carotenoides. A expressão de *NCED*, portanto, desencadeia uma cascata de respostas moleculares que melhoram a resistência da planta à seca (Asad *et al.*, 2019).

Observou-se também que para alguns genes testados as cultivares IAC 125 RN(4I) e MGS Paraíso 2 (5I), apresentaram maiores níveis de expressão quando irrigadas. Na Figura 7, IAC 125 RN (4I) sob irrigação a expressão dos genes *CaAPX5*, *CaMYB1* e *PIP 1:3* foi maior quando comparada ao sequeiro, enquanto na MGS Paraíso 2 sob irrigação, os genes *CaAPX5*, *CaNCED* e *CaDHNI* tiveram aumento de expressão em relação às plantas do sequeiro.

Mesmo em ausência de estresse hídrico, como notado nas cultivares IAC 125 RN (4I) e MGS Paraíso 2 (5I), plantas podem experimentar pequenos sinais de estresse (como flutuações na temperatura ou radiação solar mais intensa) que podem induzir a expressão de genes antioxidantes como uma medida preventiva (Suzuki; Mittler, 2006), o que pode ser parte de um mecanismo homeostático que mantém os níveis de antioxidantes em equilíbrio, mesmo quando não há estresse hídrico evidente (Foyer; Noctor, 2005).

b) Comparação dos perfis de expressão dos GCs entre as cultivares

Considerando a cultivar Obatã IAC 4739 (2) como sensível ao déficit hídrico devido as características fisiológicas (Tabela 6), esta cultivar mostrou menores níveis de expressão de genes como *PIP 1:3* sob déficit hídrico, refletindo sua menor capacidade de transporte de água e menor potencial hídrico. A elevada expressão de *CaAPX5* pode ser uma resposta ao aumento do estresse oxidativo, indicando uma limitação fisiológica na capacidade de mitigar o estresse hídrico.

Neste estudo molecular, as cultivares que evidenciaram seu potencial de tolerância ao déficit hídrico foram, IAC Catuaí SH3 (1) e MGS Paraíso 2 (5), ambas exibiram maior expressão relativa de genes associados à tolerância ao déficit hídrico, como *PIP 1:3*, *CaGols3* e *CaDHNI*, além de um melhor potencial hídrico. Isso indica uma adaptação eficiente para manter a homeostase celular e a eficiência do transporte de água sob condições de déficit hídrico (Figura 5),

Quanto às respostas moleculares de tolerância à limitação hídrica, é possível que a cultivar IAC Catuaí SH3 já possua altos níveis de expressão basal desses genes em condições normais. Isso pode ser resultado de seleção artificial em programas de melhoramento genético. Cafeeiros arábicos da série BA, portadores de genes do *Coffea liberica* Hiern, mostram-se mais tolerantes à seca do que outros cafeeiros arábicos (Mazzafera; Carvalho, 1987) estudos

realizados por Fazuoli *et al.* (2015) em condições de campo evidenciaram a boa tolerância ao déficit hídrico da cv. IAC Catuaí SH3, que por sua vez apresentou melhor índice de turgescência.

Quanto à resposta molecular da cv. MGS Paraíso 2, pode ser atribuída tanto às adaptações fisiológicas e anatômicas aos estresse hídrico quanto à influência do gene de *Coffea canephora*. *Coffea canephora* Pierre ex A.Froehner, apresenta maior sistema radicular em relação aos cafeeiros arábicos, sendo uma vantagem em condições de estresse hídrico (Pinheiro, 2005).

A ausência de expressão gênica nas cultivares MGS Ametista (3) e IAC 125 RN (5) pode ser atribuída a variações genéticas das cultivares que influenciam suas respostas ao estresse hídrico. Essas variações podem incluir a presença ou ausência de sequências regulatórias específicas que afetam a expressão gênica sob condições de déficit hídrico. Além disso, a expressão gênica é uma interação complexa entre o genótipo da planta e o ambiente. A resposta ao déficit pode variar dependendo de como genes específicos interagem com o ambiente físico e biológico da planta (Chaves; Maroco; Pereira, 2003).

4.2.2.2 Dispersão das cultivares avaliadas e correlação entre características fisiológicas e expressão de GCs em *Coffea arabica* sob déficit hídrico.

A análise de componentes principais (PCA) é uma ferramenta poderosa em estudos de expressão gênica, auxiliando na redução da complexidade de grandes conjuntos de dados de microarranjos e na identificação dos principais processos biológicos. Além disso, métodos robustos de PCA, foram aplicados com sucesso para detectar amostras discrepantes em dados de RNA-seq, melhorando o resultado da análise diferencial da expressão gênica (Sahoo; Pradhan, 2023).

Neste presente estudo, para verificar a correlação entre características fisiológicas (A e Mpa) e expressão gênica dos genes candidatos em cultivares de *Coffea arabica*, foi realizada análise de componentes principais na interpretação dos perfis de expressão gênica, agrupando os genes com base em seus padrões de expressão (Tabela 15).

Na figura 6A, na condição irrigada a análise de componentes principais explicaram 79,16% da variabilidade total dos dados. O primeiro componente principal (PC1) explicou 58,12% da variabilidade total, explicada pelas variáveis associadas *PIP 1:3*, *CaDHNI*, *CaAPX5* e *CaMYB1*. O PC1 foi capaz de diferenciar o perfil da expressão das cultivares IAC 125 RN e MGS Paraíso 2. O segundo componente principal explicou 21,04% da variabilidade total dos dados, e as variáveis de maior peso foram *CaNCED*, *CaPLY8a*, *CaGols3* e *PIP 1:1*. A PC2 foi capaz de separar as cultivares que exibiram menor taxa fotossintética quando irrigadas, Obatã IAC 4739 e IAC Catuaí SH3.

Em sistema irrigado, foram observados maiores níveis de expressão gênica nas cultivares MGS Paraíso 2 e IAC 125 RN. O cafeeiro MGS Paraíso 2 exibiu uma superexpressão do gene *CaNCED* e maiores valores médios para o gene *CaGols3*, que contribuíram para sua dispersão em relação às demais cultivares. Já na IAC 125 RN, foi observada a regulação positiva de vários genes, destacando-se os genes *PIP 1:1*, *PIP 1:3*, *CaDHNI* e *CaMYB1* (Figura 6A).

As cultivares Obatã IAC 4739, IAC Catuaí SH3 e MGS Ametista exibiram níveis médios intermediários de expressão gênica em comparação com as cultivares MGS Paraíso 2 e IAC 125 RN em sistema irrigado (Figura 6A).

Sob condições de déficit hídrico, as cultivares do sequeiro apresentaram um perfil diferencial de expressão gênica quando comparadas às plantas que foram mantidas irrigadas durante o período seco. Conforme apresentado na Figura 6B, as duas principais componentes explicaram 72,26% da variabilidade total dos dados. O primeiro componente (PC1) explicou 44,43% da variabilidade total, com as variáveis de maior peso sendo: *CaGols3*, *PIP 1:1*, *CaNCED*, *PIP 1:3*, *MPa* e *CaDHN*. O PC1 contribuiu para a dispersão das cultivares IAC Catuaí SH3 e MGS Paraíso 2, que, mesmo sob déficit hídrico, exibiram potencial hídrico mais alto em relação às demais. O segundo componente (PC2) explicou 27,83% da variabilidade, com as variáveis: *CaAPX5*, *CaMYB1*, e *A* com maior contribuição para esse componente.

A cultivar MGS Paraíso 2, que manteve alto seu potencial hídrico durante o déficit hídrico, evidenciou a regulação positiva dos genes *PIP 1:3* e *CaGols3*, que se expressaram em níveis mais elevados nessa cultivar. Nota-se que, sob irrigação, a mesma cultivar apresentou maior proximidade com esses genes, o que possivelmente contribuiu para o transporte de água durante o estresse. Em contraste, a expressão do gene *CaMYB1* esteve ausente nessa cultivar. Esses resultados sugerem que a resposta adaptativa da MGS Paraíso 2 ao estresse hídrico pode estar associada à regulação específica desses genes (Figura 6B).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nossos resultados, permitiram selecionar genótipos com maior manutenção do potencial hídrico, associados as melhores trocas gasosas mesmo sob déficit hídrico, na fase inicial da lavoura, em condições de campo. Pois, a utilização apenas do potencial hídrico como critério de seleção de genótipos tolerantes, pode resultar no falso positivo, resultando na seleção de materiais genéticos com menor desenvolvimento vegetativo (Silva *et al.*, 2022e).

Sendo assim, os genótipos IAC Catuaí SH3, MGS Aranãs, Acauã Novo, Arara, MGS Ametista, IAC 125 RN e MGS Paraíso 2 apresentaram melhor adaptação fisiológica sob restrição hídrica. Nesse sentido, a maior manutenção do balanço hídrico foi favorável não somente à sobrevivência, mas também ao crescimento vegetativo sob seca. Além disso, esses genótipos apresentaram boa resiliência, isto é, boa capacidade de recuperação após déficit hídrico.

Na caracterização anatômica, os genótipos IAC Catuaí SH3, MGS Ametista, IAC 125 RN, MGS Paraíso 2, MGS Aranãs e Acauã Novo apresentaram características anatômicas que indicam uma boa adaptação às condições de déficit hídrico, como espessura da epiderme adaxial, espessura da parênquima paliçádica, menor diâmetro de vasos do xilema, associado a maior frequência de vasos do xilema e maior condutividade hidráulica relativa, sendo genótipos promissores na fase inicial da lavoura para ambientes com baixa disponibilidade de água no período seco, como por exemplo, a região do Cerrado Mineiro,

Por outro lado, o genótipo Obatã IAC 4739 mostrou-se mais sensível à limitação hídrica durante o período seco, seguido dos genótipos IPR 103 e Arara, com características fisiológicas e anatômicas pouco eficientes para garantir boa sobrevivência e crescimento vegetativo sob déficit hídrico. No entanto, essa situação pode vir ser contornada com suprimento de água via irrigação nos períodos mais críticos do ano, no Cerrado Mineiro.

Por fim, o estudo da expressão gênica dos genótipos previamente caracterizados fisiologicamente e anatomicamente como potencialmente tolerantes ao déficit hídrico revelou informações importantes. Este estudo mostrou que aquaporinas, como a isoforma *PIP1:3*, são relevantes em cultivares de *Coffea arabica* potencialmente tolerantes à seca, contribuindo para a base de conhecimento existente e abrindo caminhos para futuras pesquisas.

Além disso, a cultivar IAC Catuaí SH3, que apresentou regulação positiva para a maioria dos genes sob condições de déficit hídrico, pode ser priorizada em estudos futuros e em programas de melhoramento genético do cafeeiro arábica, na tentativa de desenvolver cultivares promissoras à deficiência hídrica.

6 CONCLUSÕES

Em suma, os genótipos com maior potencial de tolerância ao déficit hídrico foram MGS Ametista, MGS Aranãs, MGS Paraíso 2, IAC Catuaí SH3, IAC 125 RN e Acauã Novo, que apresentaram maior manutenção do potencial hídrico associados à uma boa eficiência hídrica, impactando positivamente nas trocas gasosas e no crescimento inicial durante o déficit hídrico em condições de campo.

Os genótipos IAC Catuaí SH3 e MGS Paraíso 2 mostraram respostas moleculares eficientes no transporte de água e na conservação do potencial hídrico durante o período seco. Os genes *PIP 1:3*, *CaGolS3* e *CaDHN1*, exibiram maior expressão gênica relativa sob déficit hídrico em cultivares de *Coffea arabica*.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, Adeel *et al.* Selection and validation of reference genes for RT-qPCR analysis in *Aegilops tauschii* (Coss.) Under different abiotic stresses. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 20, p. 11017, 2021.
- AGUIAR JÚNIOR, Lindomar Velho de *et al.* Características dos vasos do xilema e perda de condutividade hidráulica de quatro porta-enxertos de pessegueiros. **Observatório de La Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 7, p. 7087-7102, 2023.
- ALEXANDERSSON, Erik *et al.* Whole gene family expression and drought stress regulation of aquaporins. **Plant molecular biology**, v. 59, p. 469-484, 2005.
- ALKIMIM, Emily Ruas *et al.* Marker-assisted selection provides arabica coffee with genes from other *Coffea* species targeting on multiple resistance to rust and coffee berry disease. **Molecular Breeding**, v. 37, p. 1-10, 2017.
- ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVES, M. E. B. Respostas do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) a diferentes lâminas de irrigação e fertirrigação. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras**, 94 p., 1999.
- AMARAL, J. A. T. do; RENA, A. B.; AMARAL, J. F. T. do. Crescimento vegetativo sazonal do cafeeiro e sua relação com fotoperíodo, frutificação, resistência estomática fotossíntese. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 3, p. 377-384, 2006.
- ANTHONY, François *et al.* The origin of cultivated *Coffea arabica* L. varieties revealed by AFLP and SSR markers. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 104, p. 894-900, 2002.
- ARABKARI, Vahid *et al.* Relative and absolute expression analysis of microRNAs associated with luminal a breast cancer—a comparison. **Pathology & Oncology Research**, v. 26, p. 833-844, 2020.
- AROCA, Ricardo; PORCEL, Rosa; RUIZ-LOZANO, Juan Manuel. Regulation of root water uptake under abiotic stress conditions. **Journal of experimental botany**, v. 63, n. 1, p. 43-57, 2012.
- ASAD, Muhammad Asad Ullah *et al.* Abiotic stresses intervene with ABA signaling to induce destructive metabolic pathways leading to death: premature leaf senescence in plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 2, p. 256, 2019.
- BACCARI, Sahar *et al.* Linking leaf water potential, photosynthesis and chlorophyll loss with mechanisms of photo-and antioxidant protection in juvenile olive trees subjected to severe drought. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 614144, 2020.
- BALDONI, Elena; GENGA, Annamaria; COMINELLI, Eleonora. Plant MYB transcription factors: their role in drought response mechanisms. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 16, n. 7, p. 15811-15851, 2015.

BALIZA, Danielle Pereira *et al.* Trocas gasosas e características estruturais adaptativas de cafeeiros cultivados em diferentes níveis de radiação. **Coffee Science**, v. 7, n. 3, p. 250-258, 2012.

BARSALOBRES-CAVALLARI, Carla F. *et al.* Identification of suitable internal control genes for expression studies in *Coffea arabica* under different experimental conditions. **BMC Molecular Biology**, v. 10, p. 1-11, 2009.

BARTLETT, M. S. Propriedades de suficiência e testes estatísticos. **Proceedings of the Royal Statistical Society**, Series A, p. 268-282, 1937.

BATISTA, Luiz Antônio *et al.* Anatomia foliar e potencial hídrico na tolerância de cultivares de café ao estresse hídrico. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, p. 475-481, 2010.

BILEN, Christine *et al.* A systematic review on the impacts of climate change on coffee agrosystems. **Plants**, v. 12, n. 1, p. 102, 2023.

BOGEAT-TRIBOULOT, Marie-Béatrice *et al.* Gradual soil water depletion results in reversible changes of gene expression, protein profiles, ecophysiology, and growth performance in *Populus euphratica*, a poplar growing in arid regions. **Plant physiology**, v. 143, n. 2, p. 876-892, 2007.

Brazilian Farmers. Brazil's 2024 coffee harvest is expected to exceed last year's by 5.5%. **Brazilian Farmers**, 2024. Disponível em: < <https://brazilianfarmers.com/news/brazils-2024-coffee-harvest-is-expected-to-exceed-last-years-by-5-5/> > Acesso em: 15 mai. de 2024.

BRODRIBB, Tim J.; COCHARD, Hervé. Hydraulic failure defines the recovery and point of death in water-stressed conifers. **Plant physiology**, v. 149, n. 1, p. 575-584, 2009.

BUNN, Christian *et al.* A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. **Climatic change**, v. 129, n. 1, p. 89-101, 2015.

CAMARGO, Marcelo Bento Paes de. Impacto da variabilidade e da mudança climática na produção de café arábica no Brasil. **Bragantia**, v. 69, p. 239-247, 2010.

CANALES, Francisco J. *et al.* Drought resistance in oat involves ABA-mediated modulation of transpiration and root hydraulic conductivity. **Environmental and Experimental Botany**, v. 182, p. 104333, 2021.

CAO, Yunpeng *et al.* MYB transcription factors as regulators of secondary metabolism in plants. **Biology**, v. 9, n. 3, p. 61, 2020.

CARLQUIST, S. Comparative Wood Anatomy. **Springer**, p. 436, 1988.

CARVALHO, Carlos Henrique Mesquita de *et al.* Evolução do crescimento do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) irrigado e não irrigado em duas intensidades de plantio. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, p. 243-250, 2006a.

CARVALHO, Filipe Gimenez *et al.* Tolerância ao déficit hídrico em mudas de genótipos de café portadores de genes de diferentes espécies. **Coffee Science**, v. 12, n. 2, p. 156-163, 2017b.

CARVALHO, Gladyston Rodrigues *et al.* Cafeicultura do Cerrado. **EPAMIG**, 22. ed., 564 p., 2021c.

CASTRO, E. M.; PEREIRA, F. J.; PAIVA, R. Histologia Vegetal: estrutura e função de órgãos vegetativos. **UFLA**, 234 p., 2009.

CHAVES, Manuela M.; MAROCO, João P.; PEREIRA, João S. Understanding plant responses to drought from genes to the whole plant. **Functional plant biology**, v. 30, n. 3, p. 239-264, 2003.

CHOAT, Brendan *et al.* Global convergence in the vulnerability of forests to drought. **Nature**, v. 491, n. 7426, p. 752-755, 2012.

CLIFFORD, M. N.; WILSON, K. C. Coffe: botany, biochemistry and production of beans and beverage. **AVI American Edition**, 1. ed., 469 p., 1985.

CNA. Seca provocou prejuízos à produção cafeeira no Brasil em 2020. **Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil**, 2021. Disponível em : < <https://www.cnabrazil.org.br/noticias/seca-provocou-prejuizos-a-producao-cafeeira-no-brasil-em-2020> >. Acesso em: 17 jun. de 2024.

COELHO, Larissa Sousa *et al.* Características morfológicas, fisiológicas e agrônômicas de cruzamentos de cafeeiro 'Icatu' x 'Catimor' submetidos a déficit hídrico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, n. Z, p. 02788, 2022.

COLODETTI, Tafarel Victor *et al.* Implicações do manejo hídrico na dissimilaridade entre genótipos de café arábica com base nos defeitos dos grãos. *In*: XXVII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XXIII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e XIII Encontro de Iniciação à Docência – Universidade do Vale do Paraíba. **Anais do XXIII Inic, XXIII Epg e XIII Inid**, p. 1-6, 2023.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de café: 2º levantamento. **Companhia Nacional de Abastecimento**, 2021. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe> >. Acesso: 30 nov. de 2022.

CONAB. Com crescimento de 8,2%, produção de café chega a 55,1 milhões de sacas em 2023. **Companhia Nacional de Abastecimento**, 2023. Disponível em: < https://cast.conab.gov.br/post/2023-12-14_4_lev_cafe/ >. Acesso: 03 jun. de 2024.

COSTA, Tatiana Santos. Análises do perfil transcriptômico e proteômico de raízes de diferentes clones de *Coffea canéfora* em condições de déficit hídrico. **Tese (Doutorado em Biotecnologia Vegetal) – Universidade Federal de Lavras**, 236 p., 2014.

COTTA, Michelle G. *et al.* The first step of aba perception and signal transduction in coffee: Evolutionary and expression of PYR/PYL/RCARs, PP2Cs and SNRK2s genes in *C. canéfora* under drought. *In* : The 26th International Conference on Coffee Science (ASIC). **ASIC**, p. 187, 2016.

CRAPARO, A. C. W. *et al.* *Coffea arabica* yields decline in Tanzania due to climate change: Global implications. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 207, p. 1-10, 2015.

CRUZ, Fernanda *et al.* Evaluation of coffee reference genes for relative expression studies by quantitative real-time RT-PCR. **Molecular Breeding**, v. 23, n. 4, p. 607-616, 2009.

DAMATTA, Fábio M. *et al.* Drought tolerance of two field-grown clones of *coffea canephora*. **Plant science**, v. 164, n. 1, p. 111-117, 2003.

DAMATTA, Fábio M. *et al.* Ecofisiologia do crescimento e da produção do cafeeiro. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, p. 485-510, 2007.

DAMATTA, Fábio M. *et al.* Sustained enhancement of photosynthesis in coffee trees grown under free-air CO₂ enrichment conditions: disentangling the contributions of stomatal, mesophyll, and biochemical limitations. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 1, p. 341-352, 2016.

DAMATTA, Fábio M.; RAMALHO, José D. Cochicho. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian journal of plant physiology**, v. 18, p. 55-81, 2006.

DAMOUR, Gaëlle; VANDAME, Marc; URBAN, Laurent. Long-term drought results in a reversible decline in photosynthetic capacity in mango leaves, not just a decrease in stomatal conductance. **Tree Physiology**, v. 29, n. 5, p. 675-684, 2009.

DAVIS, Aaron P. *et al.* An annotated taxonomic conspectus of the genus *Coffea* (Rubiaceae). **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 152, n. 4, p. 465-512, 2006.

DAVIS, Aaron P. *et al.* Hot coffee: the identity, climate profiles, agronomy, and beverage characteristics of *Coffea racemosa* and *C. zanguebariae*. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, p. 740137, 2021.

DERVEAUX, Stefaan; VANDESOMPELE, Jo; HELLEMANS, Jan. How to do successful gene expression analysis using real-time PCR. **Methods**, v. 50, n. 4, p. 227-230, 2010.

DIAS, Paulo C. *et al.* Morphological and physiological responses of two coffee progenies to soil water availability. **Journal of plant physiology**, v. 164, n. 12, p. 1639-1647, 2007.

DOMINGHETTI, Anderson William *et al.* Tolerance to drought of coffee trees produced by cuttings and somatic embryogenesis. **Coffee Science**, v. 11, n. 1, p. 117-126, 2016.

ebe67144.pdf. Acesso em: 3 jul. de 2024.

FAHN, Abraham; WERKER, Ella; BAAS, Pieter. Wood anatomy and identification of trees and shrubs from Israel and adjacent regions. **Isr. Acad. Sci. Hum.**, 1986.

FAZUOLI, Luiz Carlos *et al.* Cultivar IAC Catuaí SH3, uma contribuição do IAC para a cafeicultura. **IX Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, 3 p., 2015.

FAZUOLI, Luiz Carlos *et al.* IAC Catuaí SH3-a dwarf Arabica coffee cultivar with leaf rust resistance and drought tolerance. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 19, p. 356-359, 2019.

FERNANDES, Isabel *et al.* Understanding the impact of drought in *Coffea* genotypes: Transcriptomic analysis supports a common high resilience to moderate water deficit but a

genotype dependent sensitivity to severe water deficit. **Agronomy**, v. 11, n. 11, p. 2255, 2021.

FERRÃO, Maria Amélia Gava *et al.* Self-incompatibility and sustainable production of Conilon Coffee. *In: Ferrão Romário Gava et al. (Eds). Conilon Coffee: the Coffea canephora produced in Brazil. Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper)*, 3. ed., p. 203-221, 2019.

FERRÃO, Romário Gava *et al.* EMCAPA 8141- Robustão Capixaba, variedade clonal de café conilon tolerante à seca, desenvolvida para o estado do Espírito Santo. **Ceres**, v. 47, n. 273, p. 555-559, 2000.

FERRÃO, Romário Gava *et al.* Genética e melhoramento: desenvolvimento e recomendação de cultivares com tolerância à seca para o Espírito Santo. **Incaper em Revista**, v. 6, n. 4, p. 51-71, 2016.

FERREIRA, Daniel Furtado. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e agrotecnologia**, v. 38, p. 109-112, 2014a.

FERREIRA, Lucas Tadeu. Produção mundial de café para safra 2023-2024 totaliza 171,4 milhões de sacas de 60 kg. Embrapa Café, 2024. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/88547345/producao-mundial-de-cafe-estimada-para-safra-2023-2024-totaliza-1714-milhoes-de-sacas-de-60kg>>. Acesso em: 22 jun. de 2024b.

FIALHO, Gustavo Sessa *et al.* Comportamento de plantas de café arábica submetidas a déficit hídrico durante o desenvolvimento inicial. **Idesia (arica)**, v. 28, n. 3, p. 35-39, 2010.

FOYER, Christine H.; NOCTOR, Graham. Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses. **The plant cell**, v. 17, n. 7, p. 1866-1875, 2005.

FRANCK, Nicolas *et al.* Soluble sugars mediate sink feedback down-regulation of leaf photosynthesis in field-grown Coffea arabica. **Tree physiology**, v. 26, n. 4, p. 517-525, 2006.

FREIRE, Luciana Pereira *et al.* Análise da expressão do gene manose 6 fosfato redutase em cafeeiros submetidos ao déficit hídrico. **Coffee Science**, v. 8, p.17-23, 2013.

FREITAS, Rupert Barros de *et al.* Comportamento fisiológico de dois cultivares de Coffea arabica L submetidos à duas condições de disponibilidade hídrica. **Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, p. 917-919. 2000.

FUNDAÇÃO PROCAFÉ. Boletim de avisos fitossanitários: Alto Paranaíba/ Triângulo Mineiro. **Fundação PROCAFÉ**, n. 157, 6 p., 2023. Disponível em: <https://e3262440-ec26-4337-83ca-9389b084c1a2.usrfiles.com/ugd/e32651_d6e2a83256c1402c917f7b5b>

GALMÉS, Jeroni *et al.* Aquaporin expression in response to different water stress intensities and recovery in Richter-110 (*Vitis sp.*): relationship with ecophysiological status. **Planta**, v. 226, p. 671-681, 2007.

GHATAK, Arindam; CHATURVEDI, Palak; WECKWERTH, Wolfram. Cereal crop proteomics: systemic analysis of crop drought stress responses towards marker-assisted selection breeding. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 757, p. 1-25, 2017.

GRISI, Fernanda Almeida et al. Avaliações anatômicas foliares em mudas de café 'catuaí' e 'siriema' submetidas ao estresse hídrico. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, p. 1730-1736, 2008.

HASANUZZAMAN, Md; ZHOU, Meixue; SHABALA, Sergey. How does stomatal density and residual transpiration contribute to osmotic stress tolerance?. **Plants**, v. 12, n. 3, p. 494, 2023.

HASEGAWA, Paul M. *et al.* Plant cellular and molecular responses to high salinity. **Annual review of plant biology**, v. 51, n. 1, p. 463-499, 2000.

ILYAS, Muhammad *et al.* Drought tolerance strategies in plants: a mechanistic approach. **Plant Growth Regulation**, v. 40, p. 926-944, 2021.

IPCC. Climate Change 2021: the physical Science Basis. **Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Nações Unidas Para o Meio Ambiente**, 2022. Disponível em: < <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/> >. Acesso em: 25 mar. de 2023.

JANG, Ji Young *et al.* An expression analysis of a gene family encoding plasma membrane aquaporins in response to abiotic stresses in *Arabidopsis thaliana*. **Plant molecular biology**, v. 54, p. 713-725, 2004.

JANG, Ji Young *et al.* Transgenic *Arabidopsis* and tobacco plants overexpressing an aquaporin respond differently to various abiotic stresses. **Plant Molecular Biology**, v. 64, p. 621-632, 2007.

JOHANSEN, D. A. Plant Microtechnique. **New York: Mc-Graw-Hillbook Company**. 1940.

KAPOOR, Dhriti *et al.* The impact of drought in plant metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. **Applied Sciences**, v. 10, n. 16, p. 5692, 2020.

KARASAWA, S. Crescimento do cafeeiro (*Coffea arabica* L. cv. Topázio MG-1190) sob diferentes manejos de irrigação localizada. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Lavras**, 72 p., 2001.

KRAMER, Paul J.; BOYER, John S. Water relations of plants and soils. **Academic press**, 1995.

LASHERMES, Philippe *et al.* Molecular characterisation and origin of the *Coffea arabica* L. genome. **Molecular and General Genetics MGG**, v. 261, n. 2, p. 259-266, 2009.

LEIVA-ERIKSSON, Néida *et al.* Differential expression patterns of non-symbiotic hemoglobins in sugar beet (*Beta vulgaris* ssp. *vulgaris*). **Plant and cell physiology**, v. 55, n. 4, p. 834-844, 2014.

- LI, Guowei; SANTONI, Véronique; MAUREL, Christophe. Plant aquaporins: roles in plant physiology. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects**, v. 1840, n. 5, p. 1574-1582, 2014.
- LIBARDI, V. C. M.; AMARAL, J. A. T.; AMARAL, J. F. T. Crescimento vegetativo sazonal do cafeeiro (*Coffea canephora* Pierre var. *Conilon*) no sul do Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n. 1, p. 23-28, 1998.
- LIMA FILHO, Tarcísio *et al.* Características físico-químicas de bebidas de café tipo expresso preparadas a partir de blends de café arábica e conilon. **Revista Ceres**, v. 62, n. 04, p. 333-339, 2015.
- LIVAK, Kenneth J.; SCHMITTGEN, Thomas D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta CT}$ method. **methods**, v. 25, n. 4, p. 402-408, 2001.
- LYNCH, Jonathan P. Roots of the second green revolution. **Australian Journal of Botany**, v. 55, n. 5, p. 493-512, 2007.
- MAPA. Registro Nacional de Cultivares: cultivares ou espécies registradas. **Ministério da Agricultura e Pecuária**, 2024. Disponível em: < <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/sementes-e-mudas/registro-nacional-de-cultivares/cultivares-ou-especies-registradas> >. Acesso em: 8 jul. de 2024.
- MARQUES, Isabel *et al.* Overexpression of water-responsive genes promoted by elevated CO₂ reduces ROS and Enhances drought tolerance in *Coffea* species. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 4, p. 3210, 2023.
- MARRACCINI, Pierre *et al.* Differentially expressed genes and proteins upon drought acclimation in tolerant and sensitive genotypes of *Coffea canephora*. **Journal of experimental botany**, v. 63, n. 11, p. 4191-4212, 2012.
- MARRACCINI, Pierre. Gene expression in Coffee. In: LÜTTGE, Ulrich *et al.* Progress in Botany. **Springer**, v. 82, p. 43-111, 2020.
- MARTIM, S. A. Pulverização do cafeeiro com açúcar: potencial de uso em mudas submetidas à deficiência hídrica e na recuperação de plantas atingidas por Glyphosate. **Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Lavras**, 67 p., 2003.
- MARTINS, Cristiani Campos *et al.* Manejo da irrigação por gotejamento no cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Bioscience Journal**, v. 23, n. 2, 2007a.
- MARTINS, Everton *et al.* Influência das condições climáticas na produtividade e qualidade do cafeeiro produzido na região do sul de Minas Gerais. **Ciência do Café**, v. 10, p. 499-506, 2015b.
- MARTINS, Samuel C. V. *et al.* How do coffee trees deal with severe natural droughts? An analysis of hydraulic, diffusive and biochemical components at the leaf level. **Trees**, v. 33, p. 1679-1693, 2019c.

- MARTINS, Samuel C. V. *et al.* Understanding the low photosynthetic rates of sun and shade coffee leaves: bridging the gap on the relative roles of hydraulic, diffusive and biochemical constraints to photosynthesis. **PLoS One**, v. 9, n. 4, p. e95571, 2014c.
- MAZZAFERA, Paulo; CARVALHO, Alcides. Produção e tolerância à seca de cafeeiros. **Bragantia**, v. 46, p. 403-415, 1987.
- MEDEIROS, Rodrigo de Vasconcellos Viana; RODRIGUES, Patrícia Mattos Amato. A economia cafeeira no Brasil e a importância das inovações para essa cadeia. **A Economia em Revista-AERE**, v. 25, n. 1, p. 1-12, 2017.
- MEINZER, Frederick C.; GOLDSTEIN, Guillermo; GRANTZ, David A. Carbon isotope discrimination in coffee genotypes grown under limited water supply. **Plant Physiology**, v. 92, n. 1, p. 130-135, 1992.
- MELKE, Abayneh; FETENE, Masresha. Eco-physiological basis of drought stress in coffee (*Coffea arabica* L.) in Ethiopia. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, p. 225-239, 2014.
- MELO, Emanuelle Ferreira *et al.* Anatomic and physiological modifications in seedlings of *Coffea arabica* cultivar Siriema under drought conditions. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, p. 25-33, 2014.
- MERGA, Dawit; BEKSISA, Lemi. Mechanisms of Drought Tolerance in Coffee (*Coffea arabica* L.): Implication for Genetic Improvement Program. **American Journal of BioScience**, v. 11, n. 3, p. 63-70, 2023.
- MINIUSSI, Matilda *et al.* Aquaporins in *Coffea arabica* L.: Identification, expression, and impacts on plant water relations and hydraulics. **Plant physiology and biochemistry**, v. 95, p. 92-102, 2015.
- NAZARENO, Rodrigo Barbosa *et al.* Crescimento inicial do cafeeiro Rubi em resposta a doses de nitrogênio, fósforo e potássio e a regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 8, p. 903-910, 2003.
- O'BRIEN, TrP; FEDER, N. M. E. M.; MCCULLY, Mi E. Polychromatic staining of plant cell walls by toluidine blue O. **Protoplasma**, v. 59, p. 368-373, 1964.
- OLIVEIRA, I. *et al.* Compared leaf anatomy and water relations of commercial and traditional *Prunus dulcis* (Mill.) cultivars under rain-fed conditions. **Scientia Horticulturae**, v. 229, p. 226-232, 2018a.
- OLIVEIRA, Leilane Nicolino Lamarão de *et al.* Seleção de genitores de *Coffea canephora* das variedades botânicas Conilon e Robusta visando à produção de híbridos intervarietais. **Ciência Rural**, v. 48, p. e20170444, 2018b.
- ORTEGA, Antonio César; JESUS, Clesio Marcelino de. Café e território: a cafeicultura no Cerrado Mineiro. **Alínea Editora**, 246 p., 2012.
- OVALLE-RIVERA, Oriana *et al.* Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. **PloS one**, v. 10, n. 4, p. e0124155, 2015.

- PARTELLI, Fábio Luiz *et al.* Low temperature impact on photosynthetic parameters of coffee genotypes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 11, p. 1404-1415, 2009.
- PELOSO, Anelisa de Figueiredo *et al.* Limitações fotossintéticas em folhas de cafeeiro arábica promovidas pelo déficit hídrico. **Coffee Science**, v. 12, n. 3, p. 389-399, 2017.
- PEREIRA, Tiago Campos. Introdução às técnicas de PCR convencional, em tempo real e digital. **Sociedade Brasileira de Genética**, v. 5, 232 p., 2018.
- PINHEIRO, Hugo A. *et al.* Drought tolerance is associated with rooting depth and stomatal control of water use in clones of *Coffea canephora*. **Annals of botany**, v. 96, n. 1, p. 101-108, 2005.
- PINHO, Leandro Glaydson da Rocha *et al.* Mudanças climáticas e a produção de café conilon na microrregião Centro-Oeste do estado do Espírito Santo. **Revista Ifes Ciência**, v. 7, n. 1, p. 01-14, 2021.
- QUEIROZ-VOLTAN, Rachel Benetti *et al.* Caracterização da anatomia foliar de cafeeiros arábica em diferentes períodos sazonais. **Biotemas**, v. 27, n. 4, p. 1-10, 2014.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria**, 2020. Disponível em: < <http://www.R-project.org> >. Acesso em: 23 mar. de 2021.
- RAMACHANDRAN, Prashanth *et al.* Continuous root xylem formation and vascular acclimation to water deficit involves endodermal ABA signalling via miR165. **Development**, v. 145, n. 3, p. dev159202, 2018.
- RAMACHANDRAN, Prashanth *et al.* Coping with water limitation: hormones that modify plant root xylem development. **Frontiers in plant science**, v. 11, p. 570, 2020.
- RAMALHO, J. C. , *et al.* Resposta cruzada ao estresse do sistema antioxidante promovida por condições superpostas de seca e frio em *Coffea* spp. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198694>, 2018.
- RAMALHO, J. C. *et al.* Cold impact and acclimation response of *Coffea* spp. plants. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, p. 5-18, 2014.
- RAMIRO, Daniel Alves *et al.* Anatomical characterization of leaves from coffee plants resistant and susceptible to leaf miner. **Bragantia**, v. 63, p. 363-372, 2004.
- RAVEN, John A. Speedy small stomata?. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 6, p. 1415-1424, 2014.
- REIS, André Moraes *et al.* Early selection of drought-tolerant *Coffea arabica* genotypes at the seedling stage using functional divergence. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, p. e72412, 2022.
- REIS, André Moraes. Caracterização morfofisiológica de genótipos de *Coffea arabica* sob déficit hídrico. **Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras**, 51 p., 2015.

RIBEIRO, Márcia de Nazaré Oliveira *et al.* Anatomia foliar de mandioca em função do potencial para tolerância à diferentes condições ambientais. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 43, p. 354-361, 2012.

ROCHA, Omar Cruz *et al.* Programa para monitoramento de irrigação do cafeeiro no cerrado. **Embrapa Cerrados**, 1 p., 2006.

RODA, Newton de Matos *et al.* Uso de caulim processado como técnica sustentável de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas na produção agrícola. **REUNIR Revista de Administração Contabilidade e Sustentabilidade**, v. 13, n. 1, p. 171-183, 2023.

RODRIGUES, Rogério Rangel *et al.* Disponibilidade hídrica no solo no desenvolvimento inicial do cafeeiro conilon. **Coffee Science**, v. 10, n. 1, p. 46–55, 2015a.

RODRIGUES, Silvestre *et al.* Desenvolvimento do café arábica (*Coffea arabica*) submetido a diferentes lâminas de irrigação, nas condições do estado de Rondônia. **Global Science and Technology**, v. 3, n. 1, 2010b.

RONCHI, Cláudio Pagotto *et al.* Respostas ecofisiológicas de cafeeiros submetidos ao déficit hídrico para concentração da florada no Cerrado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 01, p. 24-32, 2015.

RORAT, Tadeusz. Plant dehydrins—tissue location, structure and function. **Cellular & molecular biology letters**, v. 11, p. 536-556, 2006.

SAAVEDRA, Xandra *et al.* The nuclear interactor PYL8/RCAR3 of *Fagus sylvatica* FsPP2C1 is a positive regulator of abscisic acid signaling in seeds and stress. **Plant physiology**, v. 152, n. 1, p. 133-150, 2010.

SAHOO, Rajashree; PRADHAN, Ranjan K. Effectiveness of Principal Component Analysis in Functional Mapping of Gene Expression Profiles. *In: 2023 International Conference on Recent Advances in Electrical, Electronics & Digital Healthcare Technologies (REEDCON)*. **IEEE**, p. 712-716., 2023.

SANTANA, Márcio S.; OLIVEIRA, Carlos A. da S.; QUADROS, Michael. Crescimento inicial de duas cultivares de cafeeiro adensado influenciado por níveis de irrigação localizada. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 3, p. 644-653, 2004.

SANTINATO, Felipe *et al.* Tolerância ou suscetibilidade à seca de cultivares em Carmo do Rio Paraníba. **45º Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras**, p. 151, 2019.

SANTINATO, Felipe. *et al.* Sistema radicular do cafeeiro em lavouras irrigadas mecanizadas das cultivares Catuaí, Acauã Novo e Apoatã. **46º Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras**, p. 2-4, 2018.

SANTOS, Adriana Brombini dos; MAZZAFERA, Paulo. Aquaporins and the control of the water status in coffee plants. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 25, p. 79-93, 2013.

SANTOS, Cyntia Stephânia dos *et al.* Agronomic, anatomic and physiological characterization of *Coffea arabica* L. genotypes on irrigated system in the Central Cerrado. **Coffe Science**, v. 17, 2022a.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos *et al.* Sistema brasileiro de classificação de solos. **EMBRAPA**, 3 ed., 353 p., 2013c.

SANTOS, Jacqueline de Oliveira *et al.* Análises da expressão dos genes APX e CAPYL8A em progênies de *Coffea Arabica* submetidas ao déficit hídrico. **X Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, 2019d.

SANTOS, M. de Oliveira *et al.* Photochemical efficiency correlated with candidate gene expression promote coffee drought tolerance. **Scientific reports**, v. 11, n. 1, 2021b.

SANTOS, Reginaldo Ferreira; CARLESSO, Reimar. Water deficit and morphologic and physiologic behavior of the plants. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, p. 287-294, 1998e.

SANTOS, Tiago B. dos *et al.* Expression of three galactinol synthase isoforms in *Coffea arabica* L. and accumulation of raffinose and stachyose in response to abiotic stresses. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 49, n. 4, p. 441-448, 2011f.

SEELIG, Hans-Dieter; STONER, Richard J.; LINDEN, James C. Irrigation control of cowpea plants using the measurement of leaf thickness under greenhouse conditions. **Irrigation Science**, v. 30, p. 247-257, 2012.

SEGATTO, Fernanda Bastos *et al.* Técnica para o estudo da anatomia da epiderme foliar de batata. **Ciência Rural**, v. 34, n. 5, p. 1597-1601, 2004.

SEKI, Motoaki *et al.* Monitoring the expression profiles of 7000 Arabidopsis genes under drought, cold and high-salinity stresses using a full-length cDNA microarray. **The Plant Journal**, v. 31, n. 3, p. 279-292, 2002.

SERA, Tumoru; SERA, Gustavo Hiroshi; FAZUOLI, Luiz Carlos. IPR 103: cultivar de café arábica rústica mais adaptada para regiões quentes e solos pobres. In: 39º Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras. **Anais do Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras**, 2013.

SHINOZAKI, Kazuo; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, Kazuko; SEKI, Motoaki. Regulatory network of gene expression in the drought and cold stress responses. **Current opinion in plant biology**, v. 6, n. 5, p. 410-417, 2003.

SILVA, Adriana Lúcia da *et al.* Variability of water balance components in a coffee crop in Brazil. **Scientia Agricola**, v. 63, p. 105-114, 2006a.

SILVA, Daliane Teixeira *et al.* Coffee production and geographical indications (GI): an analysis of the world panorama and the Brazilian reality. **Journal of Sustainable Development**, v. 16, n. 3, p. 47-62, 2023b.

SILVA, Emerson A. *et al.* Seasonal changes in vegetative growth and photosynthesis of Arabica coffee trees. **Field Crops Research**, v. 89, n. 2-3, p. 349-357, 2004c.

SILVA, Patrícia Carvalho da *et al.* Physiological changes of Arabica coffee under different intensities and durations of water stress in the Brazilian Cerrado. **Plants**, v. 11, n. 17, p. 2198, 2022d.

SILVA, V. A. et al. Resposta fisiológica de clone de café Conilon sensível à deficiência hídrica enxertado em porta-enxerto tolerante. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 5, p. 457-464, 2010e.

SILVA, Vânia Aparecida *et al.* Reciprocal grafting between clones with contrasting drought tolerance suggests a key role of abscisic acid in coffee acclimation to drought stress. **Plant Growth Regulation**, v. 85, p. 221-229, 2018e.

SILVA, Vânia Aparecida et al. Strategy for selection of drought-tolerant arabica coffee genotypes in Brazil. **Agronomy**, v. 12, n. 9, p. 2167, 2022e.

SOUZA, Thiago Corrêa de *et al.* Leaf plasticity in successive selection cycles of 'Saracura' maize in response to periodic soil flooding. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 1, p. 16-24, 2010.

SUZUKI, Nobuhiro; MITTLER, Ron. Reactive oxygen species and temperature stresses: a delicate balance between signaling and destruction. **Physiologia plantarum**, v. 126, n. 1, p. 45-51, 2006.

TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. **Artmed Editora LTDA**, 6. ed., 2017.

TAPAÇA, Inocência da Piedade Ernesto *et al.* Genomic evaluation of *Coffea arabica* and its wild relative *Coffea racemosa* in Mozambique: Settling resilience keys for the coffee crop in the context of climate change. **Plants**, v. 12, n. 10, p. 2044, 2023.

UTHSCSA. ImageTool (Version 3.0) [Software]. **University of Texas Health Science Center at San Antonio**, 2021.

VAN DER VOSSSEN, Herbert; BERTRAND, Benoît; CHARRIER, André. Next generation variety development for sustainable production of arabica coffee (*Coffea arabica* L.): a review. **Euphytica**, v. 204, n. 2, p. 243-256, 2015.

VIEIRA, Natalia G. *et al.* Different molecular mechanisms account for drought tolerance in *Coffea canephora* var. Conilon. **Tropical plant biology**, v. 6, p. 181-190, 2013.

WAKJIRA, Feyera Senbeta. Biodiversity and ecology of Afromontane rainforests with wild *Coffea arabica* L. populations in Ethiopia. **Cuvillier Verlag**, v. 10, 2006.

WANG, Xiaoyu *et al.* Update on cuticular wax biosynthesis and its roles in plant disease resistance. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 15, p. 5514, 2020.

YAGUINUMA, Diliane Harumi *et al.* Genome-Wide identification, evolution, and expression profile of aquaporin genes in *Coffea canephora* in response to water deficit. **Plant Molecular Biology Reporter**, v. 39, p. 146-162, 2021.

YU, Zhengyang; WANG, Xin; ZHANG, Linsheng. Structural and functional dynamics of dehydrins: a plant protector protein under abiotic stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 11, p. 3420, 2018.

APÊNDICES

Apêndice A – Genes candidatos para tolerância à seca, nome da proteína, *primers* correspondentes e números de acesso do GenBank (GB) de sequências EST de café usadas em qPCR.

Nome da Proteína	Nome do Gene	Sequência 5'- 3'	Números GB
Aquaporinas	<i>PIP 1:1</i>	F: CTGGGAGCAATATGTGGTGCT R: TGTAACCTCCGTTACGACGT	
Aquaporinas	<i>PIP 1:3</i>	F: CACCACCAGCACCCCTCTT R: GAACTCAGCAATACCAGCCCTG	
Ascorbato peroxidase	<i>CaAPX5</i>	F: ATCCAGAGGGCAGGGTACCT R: ACCAAAGCCGAGAGCAGTGA	
Desidrina	<i>CaDHN1</i>	F: CCCCTGGTCTGAGCCTCGTT R: GACGCGGAAGTAGGCGTAATT	
Fator de transcrição MYB tipo 2	<i>CaMYB1</i>	F: CCCGGCAATCTTCCAGCTA R: TCAAGCGTGGCAACTTCACT	GT689406
Galactinol sintase	<i>CaGOLS3</i>	F: CACAGGGTTGCATTGTTCGT R: CGGAGCTTGGAATAATTGATGAC	
9- cis -epoxicarotenóide dioxigenase	<i>CaNCED</i>	F: GCCTGGGAAGAGCCTGAAAC R: CCCCTCGTCACATTCATTGAA	
Receptor de ácido abscísico PYL8	<i>CaPYL8a</i>	F: GGTTTGATCAGCCCCAGAAA R: CCACTTCCCTAAGGCTTCCAA	
Ubiquitina	<i>CaUBQ10</i>	F: AAGACAGCTTCACAGAGTACAGCAT R: GGCAGGACCTTGCTGACTATA	GW488515

Fonte : Da autora (2024).