



CYNTIA STEPHÂNIA DOS SANTOS

**POTENCIAL DE ACESSOS DE *Coffea arabica* L. DO BANCO
ATIVO DE GERMOPLASMA DA EPAMIG PARA A
TOLERÂNCIA À SECA**

**LAVRAS-MG
2021**

CYNTIA STEPHÂNIA DOS SANTOS

**POTENCIAL DE ACESSOS DE *Coffea arabica* L. DO BANCO ATIVO DE
GERMOPLASMA DA EPAMIG PARA A TOLERÂNCIA À SECA**

Tese 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 Doutor.

Dr. Gladyston Rodrigues Carvalho
Orientador

Dra. Milene Alves de Figueiredo Carvalho
Coorientadora

**LAVRAS - MG
2021**

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

Dos Santos, Cyntia Stephânia.

Potencial de acessos de *Coffea arabica* L. do Banco Ativo de
Germoplasma da EPAMIG para a tolerância à seca / Cyntia
Stephânia Dos Santos. - 2021.

129 p. : il.

Orientador(a): Gladyston Rodrigues Carvalho.

Coorientador(a): Milene Alves de Figueiredo Carvalho.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Cafeeiro. 2. Deficit hídrico. 3. Fisiologia. I. Carvalho,
Gladyston Rodrigues. II. Carvalho, Milene Alves de Figueiredo. III.
Título.

CYNTIA STEPHÂNIA DOS SANTOS

**POTENCIAL DE ACESSOS DE *Coffea arabica* L. DO BANCO ATIVO DE
GERMOPLASMA DA EPAMIG PARA A TOLERÂNCIA À SECA**

**ACCESS POTENTIAL OF *Coffea arabica* L. FROM EPAMIG GERMPLASM BANK
FOR DROUGHT TOLERANCE**

Tese 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 Doutor.

APROVADA em 19 de agosto de 2021.

Dra. Elisângela Aparecida da Silva UEMG

Dra. Milene Alves de Figueiredo Carvalho EMBRAPA Café

Dr. Rubens José Guimarães UFLA

Vânia Aparecida Silva EPAMIG

Dr. Gladyston Rodrigues Carvalho
Orientador

**LAVRAS - MG
2021**

À minha mãe, Maria, por todo o amor, incentivo e por nos ensinar a importância do estudo.

*Ao meu pai, Wilson, pelo amor, apoio em todas etapas
da minha vida e exemplo de perseverança.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e pela oportunidade de realizar meus sonhos.

À minha família, pelo apoio durante esta trajetória, em especial à minha irmã Izabel, pelas contribuições e incentivo.

Ao meu namorado, Glauber, pelo apoio, paciência e pela ajuda nas avaliações.

À Universidade Federal de Lavras, à Pró-Reitoria de Pós-graduação e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia do Departamento de Agricultura, pela oportunidade de realizar o doutorado.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro ao projeto.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Consórcio Pesquisa Café e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia do Café (INCT CAFÉ) pelo apoio na execução deste trabalho.

À Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) pela disponibilização de sua estrutura e pelas contribuições para a realização deste trabalho.

Ao pesquisador Dr. Gladyston Rodrigues Carvalho, pela orientação, atenção, incentivo e aprendizado durante este trabalho.

À pesquisadora Dra. Milene Alves de Figueiredo Carvalho, pela coorientação, amizade e contribuições na construção de conhecimentos.

À pesquisadora Dra. Vânia Aparecida Silva, pela atenção e colaboração que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos membros da banca, Dra. Elisângela e Dr. Rubens, pelas contribuições.

Aos pesquisadores Dr. César e Dr. André, pelo auxílio na condução deste trabalho.

Aos amigos da EPAMIG, em especial à Ana Flávia, Nicolas e Fernando, pela disponibilidade e ajuda nas avaliações.

Aos amigos Denis, Diego e Priscila, pela ajuda nas avaliações de colheita e pós-colheita e à Larissa, pela ajuda no planejamento e nas avaliações.

Aos colegas do Laboratório de Anatomia e Fisiologia do cafeeiro do INOVACAFÉ, pela ajuda durante a condução deste trabalho, em especial à Maria Clara, Elisângela e Ana Cristina.

À Meline, pelo auxílio nas análises bioquímicas, e ao pesquisador Dr. Alan, pela disponibilidade de uso do laboratório de Análises avançadas.

Ao Departamento de Biologia, em especial ao professor Dr. Evaristo, pela disponibilidade de equipamentos para as avaliações.

À pesquisadora Angélica, ao mestrando João Paulo, do Instituto Agronômico de Campinas (IAC) e à Fazenda Boa Vista – DaTerra Atividades Agrícolas, pela disponibilidade dos dados meteorológicos.

A todos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigada!

RESUMO

Objetivou-se com o presente trabalho identificar genótipos de *Coffea arabica* L. do Banco de Germoplasma da Epamig com potencial para a tolerância à deficiência hídrica na fase de crescimento inicial e em condições de cultivo em campo. O experimento foi instalado em casa de vegetação da Estação Experimental da EPAMIG, em Lavras-MG. Foram utilizados 16 acessos de *Coffea arabica* L. do Banco Ativo de Germoplasma da EPAMIG em Patrocínio-MG, além de duas cultivares, uma considerada tolerante (IPR 100) e a outra sensível (Rubi MG1192) à deficiência hídrica. Foram realizados dois tratamentos em relação a disponibilidade hídrica, o primeiro mantendo a umidade de solo com 100% de água disponível e o segundo com suspensão total da irrigação. Foram avaliadas as características morfológicas e de crescimento vegetativo, além das características fisiológicas em 4 períodos distintos. Posteriormente, selecionou-se 7 acessos contrastantes, além das duas cultivares consideradas como padrão (uma tolerante e sensível) à deficiência hídrica para as avaliações bioquímicas e anatômicas foliares. Os acessos selecionados também foram avaliados em campo quanto a produtividade, qualidade de bebida e quanto as adaptações ao período seco. Verificou-se variação dentre os genótipos quanto as características avaliadas, demonstrando diferentes mecanismos de adaptação frente ao estresse hídrico. Houve limitação do crescimento na maioria dos genótipos avaliados em função do deficit hídrico, além de redução nas trocas gasosas e no potencial hídrico foliar. Observou-se manutenção das trocas gasosas sob baixo potencial hídrico no acesso Híbrido de Timor UFV 377-21, além de aumento do conteúdo de ácido ascórbico, sob deficit hídrico induzido e no período seco em campo. Maior crescimento no sistema radicular e manutenção de trocas gasosas foram observados no acesso Híbrido de Timor UFV 376-12. Após o retorno da irrigação, observou-se recuperação nas trocas gasosas e no potencial hídrico de antemã na maioria dos acessos avaliados. Na cultivar IPR100 verificou-se aumento da atividade das enzimas catalase e ascorbato peroxidase durante a fase de estresse. As principais adaptações anatômicas foliares, tanto na fase de desenvolvimento inicial como em plantas adultas, foram uma maior relação entre o diâmetro polar e equatorial dos estômatos, maior espessura das cutículas da face adaxial, maior frequência dos vasos do xilema e condutividade hidráulica relativa, quando submetidos ao deficit hídrico. O Híbrido de Timor UFV 376-31 destacou-se quanto às adaptações anatômicas e fisiológicas. Em relação a produtividade e qualidade de bebida destacaram-se os acessos Híbrido de Timor UFV 377-21, UFV 442-42 e UFV 376-31. De maneira geral, os acessos apresentaram adaptações ao estresse hídrico em fase de desenvolvimento inicial e em campo. Destacaram-se os Híbridos de Timor UFV 376-12, UFV 377-21 e UFV 376-31 com potencial para a tolerância à seca.

Palavras-chave: Cafeeiro. Deficit hídrico. Fisiologia. Anatomia foliar. Adaptação.

ABSTRACT

The objective of this study was to identify *Coffea arabica* L. genotypes from the Epamig Germplasm Bank with potential for tolerance to water deficit in the initial growth phase and under field conditions. The experiment was set in a greenhouse at the EPAMIG Experimental Station in Lavras-MG. Sixteen accessions of *Coffea arabica* L. from the Germplasm Bank of EPAMIG in Patrocínio-MG were used, in addition to two cultivars, one considered tolerant (IPR 100) and the other sensitive (Rubi MG1192) to water deficit. Two treatments were carried out in relation to water availability, the first maintaining soil moisture at 100% available water and the second with total suspension of irrigation. Morphological and vegetative growth characteristics were evaluated, as well as physiological characteristics in 4 different periods. Subsequently, 7 contrasting accessions were selected, in addition to the two cultivars considered as a standard (one tolerant and sensitive) to water deficit for leaf biochemical and anatomical evaluations. The selected accessions were also evaluated in the field for yield, beverage quality and adaptations to the dry period. There was a variation among genotypes regarding the evaluated characteristics, demonstrating different adaptation mechanisms in the face of water stress. There was growth limitation in most of the genotypes evaluated due to water deficit, besides a reduction in gas exchange and leaf water potential. The maintenance in gas exchange was observed under low water potential in accession 'Híbrido de Timor UFV 377-21', in addition to an increase in ascorbic acid content, under induced water deficit and in the dry period in the field. Greater growth in the root system and maintenance of gas exchange were observed in accession 'Híbrido de Timor UFV 376-12'. After the return of irrigation, recovery in gas exchange and predawn water potential was observed in most of the evaluated accessions. In cultivar IPR100, there was an increase in the activity of catalase and ascorbate peroxidase during stress. The main leaf anatomical adaptations, both in the initial developmental phase and in adult plants, were a greater relationship between polar and equatorial stomatal diameter, greater thickness of adaxial cuticles, greater frequency of xylem vessels and relative hydraulic conductivity, when submitted to water deficit. 'Híbrido de Timor UFV 376-12' stood out in terms of anatomical and physiological adaptations. Regarding yield and beverage quality, the accessions 'Híbrido de Timor UFV 377-21', 'UFV 442-42' and 'UFV 376-31' stood out. In general, the accessions showed adaptations to water stress in the initial development and in the field. 'Híbrido de Timor UFV 376-12', 'UFV 377-21' and 'UFV 376-31' stood out, with potential for drought tolerance.

Keywords: Coffee tree. Water deficit. Physiology. Leaf anatomy. Adaptation.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	
1	INTRODUÇÃO 13
2	REFERENCIAL TEÓRICO 14
2.1	Melhoramento genético do cafeeiro 14
2.2	Estresse hídrico na cultura do cafeeiro 15
2.3	Mecanismos de adaptação das plantas ao deficit hídrico 17
	REFERÊNCIAS 19
	SEGUNDA PARTE – ARTIGOS* 23
	ARTIGO 1 POTENCIAL DE GENÓTIPOS DE <i>COFFEA ARABICA</i> L. DO BANCO ATIVO DE GERMOPLASMA DA EPAMIG PARA A TOLERÂNCIA À DEFICIÊNCIA HÍDRICA 24
1	INTRODUÇÃO 25
2	MATERIAL E MÉTODOS 26
2.1	Material vegetal 26
2.2	Delineamento experimental 27
2.3	Formação das mudas e tratamento hídrico 28
2.4	Obtenção de dados microclimáticos 28
2.5	Avaliações morfológicas e crescimento 29
2.6	Avaliações fisiológicas 30
2.7	Trocas gasosas 30
2.8	Potencial hídrico na antemanhã 30
2.9	Índices de clorofilas 30
2.10	Análises estatísticas 31
3	RESULTADOS 31
3.1	Dados microclimáticos 31
3.2	Características morfológicas e de crescimento 32
3.3	Potencial hídrico, trocas gasosas e índices de clorofilas Falker 38
3.4	Correlação entre características morfofisiológicas de genótipos de <i>Coffea arabica</i> L. sob condição de deficit hídrico 47
4	DISCUSSÃO 49
5	CONCLUSÃO 55

	REFERÊNCIAS	56
	ARTIGO 2 RESPOSTAS FISIOLÓGICAS, BIOQUÍMICAS E ANATÔMICAS FOLIARES DE GENÓTIPOS DE <i>COFFEA ARABICA</i> L. SUBMETIDOS AO DEFICIT HÍDRICO.....	60
1	INTRODUÇÃO	61
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	63
2.1	Material vegetal	63
2.2	Delineamento experimental.....	63
2.3	Formação das mudas e tratamento hídrico	64
2.4	Obtenção de dados microclimáticos.....	65
2.5	Área foliar	65
2.6	Avaliações fisiológicas.....	65
2.7	Trocas gasosas	65
2.8	Potencial hídrico na antemanhã.....	66
2.9	Análises bioquímicas	66
2.10	Quantificação de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e peroxidação lipídica	66
2.11	Metabolismo antioxidante	67
2.12	Quantificação do ascorbato	68
2.13	Anatomia foliar.....	68
2.14	Análises estatísticas.....	69
3	RESULTADOS.....	70
3.1	Dados microclimáticos.....	70
3.2	Área foliar	70
3.3	Análises fisiológicas	71
3.4	Análises bioquímicas	77
3.5	Características anatômicas foliares	80
3.6	Dispersão de genótipos de <i>Coffea arabica</i> L. e correlação entre características fisiológicas, bioquímicas e anatômicas foliares, aos 25 dias após a imposição do deficit hídrico e após a reidratação das plantas.....	83
4	DISCUSSÃO.....	85
5	CONCLUSÃO	92
	REFERÊNCIAS	93
	ARTIGO 3 ASPECTOS PRODUTIVOS, QUALITATIVOS E ADAPTAÇÕES DE ACESSOS DE HÍBRIDO DE TIMOR AO PERÍODO SECO	98

1	INTRODUÇÃO	99
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	100
2.1	Material vegetal.....	100
2.1	Delineamento experimental.....	101
2.2	Caracterização climática	101
2.3	Avaliações fisiológicas, bioquímicas e anatômicas foliares	104
2.4	Condutância estomática	104
2.5	Potencial hídrico na antemanhã.....	104
2.6	Análises bioquímicas	104
2.7	Quantificação de peróxido de hidrogênio (H ₂ O ₂) e peroxidação lipídica	104
2.8	Metabolismo antioxidante	105
2.9	Quantificação do ascorbato.....	106
2.10	Anatomia foliar.....	106
2.11	Desempenho produtivo e qualidade de bebida	107
2.12	Análises estatísticas.....	108
3	RESULTADOS.....	109
3.1	Condutância estomática e potencial hídrico na antemanhã.....	109
3.2	Análises bioquímicas	110
3.3	Características anatômicas foliares	112
3.4	Dispersão de genótipos de <i>Coffea arabica</i> L. e correlação entre características fisiológicas, bioquímicas e anatômicas foliares em dois períodos sazonais.....	116
3.5	Desempenho produtivo e qualidade de bebida	118
4	DISCUSSÃO.....	119
5	CONCLUSÃO	123
	REFERÊNCIAS	125
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	129

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura tem grande importância socioeconômica no Brasil, e a produtividade da cultura tem sido ameaçada por fatores climáticos, como o aumento da temperatura e má distribuição de chuvas (DAVIS *et al.*, 2012; RUIZ-CÁRDENAS, 2015). A escassez de água afeta toda a fase fenológica do cafeeiro, prejudicando o desenvolvimento inicial, podendo prejudicar a formação de raízes, até o crescimento vegetativo (FIALHO *et al.*, 2010). Em lavouras adultas, observa-se ‘escaldadura’ e queda das folhas, abortamento de flores, além de má formação nos frutos, causando queda no rendimento de grãos (CAMARGO; CAMARGO, 2001; RUIZ-CÁRDENAS, 2015).

No entanto, as plantas podem se adaptar à restrição hídrica por meio de diversos mecanismos. Como forma de evitar o estresse hídrico as plantas podem reduzir a transpiração ou aumentar a absorção de água (TURNER, 1986), sendo que a capacidade de adaptação frente ao estresse hídrico pode variar dentre genótipos de uma mesma espécie, conferindo a eles tolerância ou suscetibilidade à restrição hídrica (CANALES *et al.*, 2021).

A seleção de genótipos tolerantes pode ser uma alternativa para minimizar os impactos causados pela seca sendo, e os bancos de germoplasma importantes fontes de variabilidade genética da espécie de café. No Brasil, cerca de 20% das espécies do gênero *Coffea* estão preservadas em bancos de germoplasma, além de híbridos inter e intraespecíficos (EIRA *et al.*, 2007).

O Banco Ativo de Germoplasma, no Campo Experimental da EPAMIG, localizado em Patrocínio-MG, possui aproximadamente 1500 acessos (CARVALHO *et al.*, 1991), que têm sido utilizados no melhoramento genético do cafeeiro como fonte de variabilidade para tolerância à pragas e doenças que acometem a cultura. No entanto, poucos estudos têm explorado esses acessos quanto à tolerância a estresses abióticos. Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho identificar genótipos de *Coffea arabica* L. do Banco de Germoplasma da EPAMIG com potencial para a tolerância à deficiência hídrica, na fase de crescimento inicial e em condições de cultivo em campo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Melhoramento genético do cafeeiro

O melhoramento genético do cafeeiro no Brasil foi marcado por duas fases. A primeira teve início em 1727 com a introdução de cultivares como Típica, Bourbon e Sumatra. A segunda fase, considerada como melhoramento científico, teve início em 1933, com a criação da Seção de Genética no Instituto Agrônomo de Campinas – IAC, que contribuiu para o lançamento das mais importantes cultivares no Brasil (MENDES; GUIMARÃES, 1998).

Inicialmente, os programas de melhoramento genético do cafeeiro buscavam quase tão somente o aumento da produtividade, porém, com o passar dos anos, outras características passaram a ser prioridade também, como o porte baixo de plantas, resistência/tolerância a pragas, doenças, qualidade de bebida, dentre outras (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008).

Os bancos de germoplasma foram e ainda são importantes fontes de variabilidade genética da espécie de café, sendo que no Brasil, cerca de 20% das espécies do gênero *Coffea* estão preservadas em bancos de germoplasma, além de híbridos inter e intraespecíficos (EIRA *et al.*, 2007).

A Empresa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), implantou em 2005, o Banco Ativo de Germoplasma, no Campo Experimental da EPAMIG em Patrocínio-MG. A coleção é composta por aproximadamente 1500 acessos (CARVALHO *et al.*, 1991) com ampla diversidade genética, composto de cultivares antigas como Típica, Bourbon e Sumatra, cultivares tradicionais, materiais exóticos, além de outras espécies de gênero *Coffea*, como *C. canephora*, *C. racemosa*, *C. dewevrei* e Híbridos interespecíficos (EIRA *et al.*, 2007; GUEDES, 2013). O banco de germoplasma tem sido utilizado em trabalhos de melhoramento genético para obtenção de materiais produtivos, com maior qualidade de bebida, além de resistência/tolerância às principais doenças do cafeeiro, como ferrugem, cercosporiose e nematoides (BOTELHO *et al.*, 2017; PESTANA *et al.*, 2015; REZENDE *et al.*, 2019; SOBREIRA *et al.*, 2015).

A maioria das cultivares resistentes à ferrugem do cafeeiro foram desenvolvidas com a introgressão do gene de Híbrido de Timor, que confere resistência a essa doença (GONÇALVES; PEREIRA, 1998; MENDES *et al.*, 2008). Identificado por volta de 1927, no Timor Leste, antiga colônia portuguesa de Timor, foi denominado Híbrido de Timor uma população de cafeeiros que se admite ter origem do cruzamento natural entre as espécies *Coffea*

arabica e *Coffea canephora* (BETTENCOURT; RODRIGUES, 1988). Na população de Híbrido de Timor, existem genótipos com variabilidade genética para a resistência à ferrugem, à cercosporiose, à antracnose dos frutos do cafeeiro, à bacteriose e aos nematoides das galhas (BOTELHO *et al.*, 2017; MENDES *et al.*, 2008, PERES *et al.*, 2017).

Avaliando resistência à cercosporiose, Botelho *et al.* (2017) verificaram dentre os acessos com maior nível de resistência a essa doença, os acessos de Híbrido de Timor UFV 377-34, 376-14 e o acesso BE 5 Wush-Wush x Híbrido Timor UFV 366-08. Esse último é derivado do cruzamento com uma variedade etíope, BE 5 Wush-Wush, conhecida por apresentar alta qualidade de bebida, além de resistência a duas raças de ferrugem (BOTELHO *et al.*, 2017).

Outros materiais de origem etíope têm sido avaliados na busca de resistências às principais espécies de nematoides que acometem a cultura do cafeeiro, com destaque para alguns cruzamentos com Amphillo, que apresentou resistência à espécie *Meloidogyne paranaensis* e *Meloidogyne incognita*, característica provavelmente herdada desse material (PERES *et al.*, 2017).

Além de resistência a doenças, tem sido buscado nos programas de melhoramento genético do cafeeiro, o desenvolvimento de genótipos com múltiplas resistências associadas à tolerância a estresses abióticos (BOTELHO *et al.*, 2017; COELHO, 2017). Dentre eles, o déficit hídrico é considerado um dos fatores mais limitantes para a produtividade das culturas (CANALES *et al.*, 2021; COELHO, 2017).

Nas regiões produtoras de café, o déficit hídrico e a má distribuição de chuvas têm afetado a produtividade. Diante disso, as instituições de pesquisa, como o Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR) (antigo Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR), Instituto Agrônômico de Campinas (IAC), Empresa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), dentre outras instituições, têm desenvolvido trabalhos na exploração da variabilidade genética disponível nos Bancos Ativos de Germoplasma, a fim de identificar genótipos com potencial para a tolerância à seca (FERRÃO *et al.*, 2016; FIALHO *et al.*, 2010; CARVALHO *et al.*, 2017; COELHO, 2017; QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014).

2.2 Estresse hídrico na cultura do cafeeiro

Diversos estudos têm demonstrado cenários de alterações climáticas para os próximos anos, prevendo aumento da temperatura até alterações na distribuição pluviométrica, com

períodos tanto de excesso de chuvas quanto períodos prolongados de deficit hídrico (DUBBERSTEIN *et al.*, 2020; IPCC, 2018; MOAT *et al.*, 2017; THIOUNE *et al.*, 2020). Devido à frequência com que ocorre, o deficit hídrico é considerado o principal estresse abiótico e afeta o crescimento, desenvolvimento e a produtividade das culturas (DAMATTA; RAMALHO, 2006; KAPOOR *et al.*, 2020).

As projeções para a cultura do café, revelam que as alterações climáticas podem levar à extinção de espécies nativas na Etiópia, tornar regiões produtoras inaptas ao cultivo, além de favorecer ataque de pragas e doenças como bicho mineiro, broca do café, ácaros e cercosporiose (DAMATTA; RAMALHO 2006; DAVIS *et al.*, 2012; MOAT *et al.*, 2017; RUIZ-CÁRDENAS, 2015).

O café arábica é uma espécie considerada sensível ao clima (DAVIS *et al.*, 2012). As condições climáticas ideais para o cultivo são: temperatura média anual entre 18 e 23 °C, altitudes entre 400 a 1200 m e precipitação entre 1200 a 1800 mm, com regimes de chuvas bem distribuídos (THOMAZIELLO *et al.*, 2000). Assim, as alterações climáticas, principalmente deficit hídrico associado às temperaturas elevadas, poderão prejudicar essa espécie durante todo seu ciclo fenológico.

No crescimento inicial do cafeeiro, o deficit hídrico afeta a formação da parte aérea, raízes, diâmetro de copa e altura das plantas (FIALHO *et al.*, 2010). Na folha, ocorrem sintomas de ‘escaldadura’, devido ao excesso de radiação, bem como queda de folhas e seca de ramos, o que ocasiona redução da área fotossinteticamente ativa da planta. Há também redução no crescimento vegetativo, com a emissão de brotos nos ramos ortotrópicos (RUIZ-CÁRDENAS, 2015). Na fase reprodutiva, há desidratação dos tubos polínicos e abortamento de flores (CAMARGO; CAMARGO, 2001). Na fase de granação dos frutos, a estiagem prolongada resulta em frutos mal formados ou chochos, grãos pequenos, e também pode causar distúrbios como a má formação dos grãos/sementes (‘coração negro’), em que o fruto apresenta lojas enegrecidas (CAMARGO; CAMARGO, 2001; RUIZ-CÁRDENAS, 2015). Esse conjunto de fatores podem levar à redução de até 80% da produtividade em anos muito secos (DAMATTA; RAMALHO, 2006).

Dentre as alternativas para minimizar os impactos causados pela deficiência hídrica na cafeicultura estão o uso da irrigação, sombreamento, manejo da lavoura, de forma a proporcionar aprofundamento das raízes, além de utilização de materiais tolerantes à seca (COLTRI *et al.*, 2019; FARES *et al.*, 2016; DUBBERSTEIN *et al.*, 2018). A seleção de genótipos tolerantes têm sido alvo de vários estudos, que buscam compreender as estratégias

de adaptação das plantas (DURAND; BRENDEL; THIEC, 2019; DUBBERSTEIN *et al.*, 2020; MENEZES-SILVA *et al.*, 2017).

2.3 Mecanismos de adaptação das plantas ao deficit hídrico

Sob condições de deficiência hídrica, algumas estratégias são desenvolvidas pelas plantas para minimizar o estresse sofrido, ocasionando modificações morfológicas, anatômicas, fisiológicas e bioquímicas nas mesmas (KAPOOR *et al.*, 2020). As plantas podem se adaptar ao estresse hídrico por mecanismos de escape, evitação e tolerância. O escape ocorre quando a planta completa seu ciclo antes desse estresse ocorrer, comportamento observado em culturas anuais. Para evitar o deficit hídrico as plantas podem manter alto o potencial hídrico por meio de adaptações como o aprofundamento de raízes, otimização no transporte de água, dentre outras. Já a tolerância ao deficit hídrico se dá quando a planta consegue sobreviver sob baixa disponibilidade hídrica, mantendo reduzidas suas funções (GHATAK; CHATURVEDI; WECKWERTH, 2017; TURNER, 1986) e para tal, podem utilizar um conjunto de mecanismos morfológicos, fisiológicos e bioquímicos.

A primeira resposta fisiológica diante da restrição hídrica é o fechamento de estômatos, que tem como objetivo evitar a transpiração excessiva (GHATAK; CHATURVEDI; WECKWERTH, 2017; KAPOOR *et al.*, 2020). Como consequência, pode ocorrer redução na taxa fotossintética, já que esse mecanismo limita o influxo de CO₂, além de afetar o potencial hídrico da planta e o transporte de solutos (ARAÚJO; DEMINICIS, 2009; THIOUNE *et al.*, 2020; ZARGAR *et al.*, 2017).

A limitação hídrica induz a superprodução de espécies reativas de oxigênio (EROs), que são moléculas instáveis e extremamente reativas, capazes de causar danos às estruturas celulares e até mesmo acarretar a morte da planta (BARBOSA *et al.*, 2014). As respostas bioquímicas de plantas ao estresse oxidativo incluem um importante sistema de defesa antioxidante, que envolve a atividade das enzimas superóxido dismutase, catalase, ascorbato peroxidase, peroxirredoxinas, dentre outras, além de metabólitos não-enzimáticos, que, de forma conjunta, atuam na eliminação das EROs e na redução do dano oxidativo (TAIZ, ZEIGER, 2010; DAMATTA; RAMALHO, 2006).

Estudos recentes têm avaliado a capacidade de resiliência de plantas de café (*Coffea canephora*) submetidas a vários ciclos de deficit hídrico, como ocorrem naturalmente em condições de campo. Clones submetidos a eventos recorrentes de seca se adaptaram por meio de ajustes bioquímicos. No clone tolerante verificou-se maior incremento na atividade da

RuBisCo, assim como aumento na atividade das enzimas relacionadas ao sistema antioxidante, ajustes favoreceram a manutenção da taxa fotossintética (MENEZES-SILVA *et al.*, 2017).

Outra estratégia observada em plantas de *Coffea arabica* L. está relacionada com a capacidade de reidratação. Mudas de cultivares consideradas potencialmente tolerantes à deficiência hídrica, podem atingir potencial hídrico de -3 MPa, sendo capazes de recuperar seu potencial hídrico mesmo após 24 dias de restrição hídrica (BRUM *et al.*, 2013).

Nas folhas são observadas adaptações para evitar a desidratação, como senescência prematura. Além disso, o estresse hídrico leva à perda de turgor, a expansão foliar cessa, reduzindo a área foliar. Estas são formas de diminuir a área exposta à transpiração (BANGAR *et al.*, 2019). Também podem ocorrer modificações nas características anatômicas foliares. Alguns estudos observaram maior espessura da cutícula, que pode aumentar a reflexão da radiação e isolar os tecidos internos (KUMAR; TIESZEN, 1980; SILVA *et al.*, 2004). Além disso, os estômatos podem sofrer mudanças na localização e no seu formato (BALIZA *et al.*, 2012; BATISTA *et al.*, 2010; QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014). Em materiais tolerantes à seca Durand, Brendel e Thiec (2019) observaram maior densidade estomática e menor tamanho do estômato, que favoreceu a dinâmica de abertura e fechamento, tornando a assimilação de CO₂ mais eficiente. Nos vasos condutores, uma modificação observada é a redução do diâmetro e aumento da frequência dos vasos do xilema, sendo que essa característica favorece o transporte de água e sais minerais e pode evitar a embolia (QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014).

Independente da intensidade do deficit hídrico, há redução na matéria seca da parte aérea e raiz, no diâmetro do caule e da copa, bem como na altura das plantas. Esse comportamento ocorre em maior ou menor intensidade de acordo com o material genético (ARAÚJO *et al.*, 2011; RODRIGUES *et al.*, 2015), sendo que alguns genótipos são capazes de manter a hidratação, por meio da maior exploração do solo, aumentando o enraizamento e aprofundando o sistema radicular (GHATAK; CHATURVEDI; WECKWERTH, 2017; KAPOOR *et al.*, 2020).

Esse conjunto de mecanismos morfológicos, fisiológicos e bioquímicos confere às plantas tolerância ao deficit hídrico, e a mensuração dessas características permite a seleção de indivíduos com maior capacidade de suportar períodos desse estresse (KAPOOR *et al.*, 2020).

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, G.L. *et al.* Influência do déficit hídrico no desenvolvimento inicial de duas cultivares de café conilon. **Irriga**, [s.l.], v. 6, n. 2, p. 115-124, 2011.
- BALIZA, D.P. *et al.* Trocas gasosas e características estruturais adaptativas de cafeeiros cultivados em diferentes níveis de radiação. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 3, p. 250-258, 2012.
- BANGAR, P. *et al.* Morphophysiological and biochemical response of mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] varieties at different developmental stages under drought stress. **Turkish Journal Biology**, [s.l.], v. 43, n. 1, p. 58-69, 2019.
- BARBOSA, M.R. *et al.* Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciência Rural**, v. 44, n. 3, p. 453-460, 2014.
- BATISTA, L. A. *et al.* Anatomia foliar e potencial hídrico na tolerância de cultivares de café ao estresse hídrico. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 3, p. 475-481, 2010.
- BETTENCOURT, A.J.; RODRIGUES JR., C.J. Principles and practice of coffee breeding for resistance to rust and other diseases. *In*: CLARCKE, R.J.; MACREA, R. (Eds.). **Coffee**. London: Elsevier Applied Science, 1988. v. 4. p. 199-235.
- BOTELHO, D.M. dos S. *et al.* Cercosporiosis resistance in coffee germplasm collection. **Euphytica**, [s.l.], v. 213, n. 117, p. 1-12, 2017.
- BRUM, C.N. *et al.* Modifications in the metabolism of carbohydrates in (*Coffea arabica* L. cv. Siriema) seedlings under drought conditions. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, p. 140-147, 2013.
- CAMARGO, A.P. de, CAMARGO, M.B P de. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, [s.l.], v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001.
- CANALES, F.J. *et al.* Drought resistance in oat involves ABA-mediated modulation of transpiration and root hydraulic conductivity. **Environmental and Experimental Botany**, [s.l.], v. 182, n. 104333, p. 1-14, 2021.
- CARVALHO, A.; MEDINA FILHO, H.P.; FAZUOLI, L.C.; GUERREIRO FILHO, O.; LIMA, M.M. Aspectos genéticos do cafeeiro. **Revista Brasileira de Genética**, [s.l.], v. 14, p. 135-183, 1991.
- CARVALHO, F.G. *et al.* Tolerância ao déficit hídrico em mudas de genótipos de café portadores de genes de diferentes espécies. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 156-163, 2017.
- COELHO, L.S. **Seleção de cafeeiros do cruzamento de Icatu x Catimor sob déficit hídrico**. 2017. 71 p. (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

COLTRI, P. P. *et al.* Low levels of shade and climate change adaptation of Arabica coffee in southeastern Brazil. **Heliyon**, [s.l.], v. 5, 2, p. 1-27, 2019.

DAMATTA, F.M.; RAMALHO, J.D.C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal Plant Physiology**, Campos dos Goytacases, v. 18, n. 1, p. 55-81, 2006.

DAVIS, A.P. *et al.* The impact of climate change on indigenous arabica coffee (*Coffea arabica*): predicting future trends and identifying priorities. **Plos One**, [s.l.], v. 7, n. 11, p. 1-13, 2012.

DUBBERSTEIN, D. *et al.* Resilient and sensitive key points of the photosynthetic machinery of *Coffea* spp. to the single and superimposed exposure to severe drought and heat stresses. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 11, n. 1049, p. 1-22, 2020.

DUBBERSTEIN, D. *et al.* Mitigation of the negative impact of warming on the Coffee crop: The Role of Increased Air [CO₂] and Management Strategies. *In*: **Climate Resilient Agriculture-Strategies and Perspectives**. Intech: Rijeka, 2018.

DURAND, M.; BRENDDEL, O.; THIEC, C.B.D.L. Altered stomatal dynamics induced by changes in irradiance and vapour-pressure deficit under drought: impacts on the whole-plant transpiration efficiency of poplar genotypes. **New Phytologist**, [s.l.], v. 222, p. 1789-1802, 2019.

EIRA, M.T.S. da *et al.* **Bancos de germoplasma de café no Brasil**. Brasília, DF: EMBRAPA Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2007. 18 p.

FARES, A. *et al.* Irrigation water requirements for seed corn and coffee under potential climate change scenarios. **Journal of Water and Climate Change**, [s.l.], v. 7, n. 1, p. 39-51, 2016.

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

FIALHO, G.S. *et al.* Comportamento de plantas de café arábica submetidas a déficit hídrico durante o desenvolvimento inicial. **Idesia**, [s.l.], v. 28, n. 3, p. 35-39, 2010.

GHATAK, A.; CHATURVEDI, P.; WECKWERTH, W. Cereal crop proteomics: Systemic analysis of crop drought stress responses towards marker-assisted selection breeding. **Frontier in Plant Science**, [s.l.], v. 8, n. 757, p. 1-25, 2017.

GONÇALVES W.; PEREIRA A.A. Resistência do cafeeiro a nematóides IV- Reação de cafeeiros derivados do Híbrido de Timor a *Meloidgyne exigua*. **Nematologia Brasileira**, [s.l.], v. 22, n. 1, p. 39-50, 1998.

GUEDES, J.M. Divergência genética entre cafeeiros do germoplasma Maragogipe. **Bragantia**, Campinas, v. 72, n. 2, p. 127-132, 2013.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change and land:** na IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable and management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. IPCC, 2018.

KAPOOR, D. *et al.* The impact of drought in plant metabolismo: how to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. **Applied Sciences**, [s.l.], v. 10, n. 5692, p. 1-19, 2020.

KUMAR, D.; TIESZEN, L.L. Photosynthesis in *Coffea arabica*: I., effects of light and temperature. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 16, p. 13-19, 1980.

MEDINA FILHO, H.P.; BORDIGNON, R.; CARVALHO, C.H.S. de. Desenvolvimento de novas cultivares de café arábica. In: CARVALHO, C. H. S. de (Ed.). **Cultivares de café:** origem, características e recomendações. Brasília, DF: EMBRAPA Café, 2008. p. 79-201.

MENDES, A.N.G. *et al.* Mutantes de *Coffea arabica* L. e cultivares de importância histórica. In: CARVALHO, C. H. S. de (Ed.). **Cultivares de café:** origem, características e recomendações. Brasília, DF: EMBRAPA Café, 2008. p. 281-298.

MENDES, A.N.G.; GUIMARÃES, R.J. **Cafeicultura empresarial:** produtividade e qualidade. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 99 p.

MENEZES-SILVA, P.E. *et al.* Photosynthetic and metabolic acclimation to repeated drought events play key roles in drought tolerance in coffee. **Journal of Experimental Botany**, [s.l.], v. 68, n. 15, p.1-14, 2017.

MOAT, J. *et al.* Resilience potencial of the Ethiopian coffee sector under climate change. **Nature Plants**, [s.l.], v. 3, n. 17081, p. 1-14, 2017.

PERES, A.C.J. *et al.* Resistance of *Coffea arabica* genotypes against *Meloidogyne paranaensis* and *M. incognita* under controlled and field conditions. **Nematology**, [s.l.], p.1-10, 2017.

PESTANA, K.N. *et al.* Inheritance study and linkage mapping of resistance loci to *Hemileia vastatrix* in Híbrido de Timor UFV 443-03. **Tree Genet Genom**, [s.l.], v. 11, n. 72, 2015.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B. *et al.* Caracterização da anatomia foliar de cafeeiros arábica em diferentes períodos sazonais. **Revista Biotemas**, Florianópolis, v. 27, n. 4, p. 1-10, 2014.

REZENDE, R.M. *et al.* Arabica coffee progênies with multiple resistant to root-knot nematodes. **Euphytica**, [s.l.], v. 215, n. 62, p. 1-9, 2019.

RODRIGUES, R.R. *et al.* Disponibilidade hídrica no solo no desenvolvimento inicial do cafeeiro conilon. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 1, p. 46-55, 2015.

RUIZ-CÁRDENAS, R. **A cafeicultura e sua relação com o clima**. Lavras: HRNS do Brasil, 2015. 23 p.

SILVA, E.A. *et al.* Seasonal changes in vegetative growth and photosynthesis in Arabica coffee trees. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, p. 349-357, 2004.

SOBREIRA, F.M. *et al.* Potential of Híbrido de Timor germplasm and its derived progênies for coffee quality improvement. **Australian Journal of Crop Science**, [s.l.], v. 9, n. 4, p. 289-295, 2015.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. (Eds.) **Plant Physiology**. 6 ed. Sinauer Assoc., Sunderland, MA, USA, 2010.

THIOUNE, E.H. *et al.* Temperature impacts the response of *Coffea canephora* to decreasing soil water availability. **Tropical Plant Biology**, [s.l.], v. 13, p. 236-250, 2020.

THOMAZIELLO, R. A. *et al.* **Café arábica: cultura e técnicas de produção**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2000. 82 p.

TURNER, N.C. Crop water deficits: a decade of progress. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 19, p. 1-51, 1986.

ZARGAR, S.M. *et al.* **Impact of drought on photosynthesis: Molecular perspective**. Plant Gene. In Press, 2017.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS*

ARTIGO 1 POTENCIAL DE GENÓTIPOS DE *Coffea arabica* L. DO BANCO ATIVO DE GERMOPLASMA DA EPAMIG PARA A TOLERÂNCIA À DEFICIÊNCIA HÍDRICA

RESUMO

Objetivou-se identificar genótipos de *Coffea arabica* L. potencialmente tolerantes à deficiência hídrica, por meio de características de crescimento e fisiológicas. O experimento foi instalado na casa de vegetação da Estação Experimental da EPAMIG, em Lavras-MG. Foram utilizados 16 acessos de *Coffea arabica* L. do Banco Ativo de Germoplasma da EPAMIG em Patrocínio-MG, além de duas cultivares, um considerado tolerante (IPR 100) e o outro sensível (Rubi MG1192) à deficiência hídrica. Foram realizados dois tratamentos de fornecimento de água, o primeiro mantendo a umidade de solo a 100% de água disponível e o segundo com suspensão total da irrigação. Foram avaliadas as seguintes características: altura, diâmetro de copa e de caule das plantas, número de nós do ramo ortotrópico, ângulo de inserção do ramo plagiotrópico em relação ao ramo ortotrópico, área foliar no início do período experimental, massa seca da raiz e parte aérea, massa seca total e comprimento de raiz. Quanto às características fisiológicas avaliou-se as trocas gasosas, potencial hídrico de antemanhã e índices de clorofilas a, b e total. As avaliações ocorreram em quatro períodos distintos: no início dos tratamentos hídricos, quando as plantas estavam em condição de 100% de água disponível no solo; aos 25 dias após a imposição do deficit hídrico (DAIDH); aos 33 dias após a imposição do deficit hídrico (DAIDH) e aos 17 dias após o retorno da irrigação no tratamento não irrigado. Verificou-se variação entre os genótipos quanto as características avaliadas. Houve limitação do crescimento na maioria dos genótipos avaliados em função do deficit hídrico. Nas avaliações fisiológicas, observou-se distinção dos genótipos irrigados e não irrigados aos 25 DAIDH, onde houve redução de 37.9, 62.0 e 58.9% na taxa fotossintética líquida, condutância estomática e transpiração, respectivamente. Aos 33 DAIDH, a maioria dos genótipos não irrigados atingiram potencial hídrico de antemanhã inferiores a -3MPa, afetando as trocas gasosas. Após o retorno da irrigação, observou-se recuperação nas trocas gasosas na maioria dos genótipos avaliados. De maneira geral, os genótipos de *Coffea arabica* L. apresentaram variabilidade quanto as características de crescimento e fisiológicas, indicando diferentes estratégias de tolerância frente ao deficit hídrico. Destacaram-se os genótipos Híbridos de Timor UFV 376-12, UFV 377-21 e UFV 376-31 e o derivado do cruzamento de BE Wush-Wush com Híbrido de Timor UFV 366-08 com potencial para a tolerância à seca, por apresentarem adaptações sob deficit hídrico que contribuíram para a manutenção do *status* hídrico em fase de crescimento inicial. As principais estratégias de adaptação observadas foram manutenção de trocas gasosas e potencial hídrico na antemanhã, redução no crescimento vegetativo da parte aérea e aumento no sistema radicular.

Palavras-chave: Cafeeiro. Tolerância à seca. Fisiologia. Morfologia.

ABSTRACT

The objective of this study was to identify *Coffea arabica* L. genotypes potentially tolerant to water deficit, through growth and physiological characteristics. The experiment was set in a greenhouse at the EPAMIG Experimental Station in Lavras-MG. Sixteen accessions of *Coffea arabica* L. from the Germplasm Bank of EPAMIG in Patrocínio-MG were used, in

addition to two cultivars, one considered tolerant (IPR 100) and the other sensitive (Rubi MG1192) to water deficit. Two water supply treatments were carried out, the first maintaining soil moisture at 100% available water and the second with total suspension of irrigation. The following characteristics were evaluated: plant height, canopy and stem diameter, number of nodes in the orthotropic branch, insertion angle of the plagiotropic branch in relation to the orthotropic branch, leaf area at the beginning of the experimental period, root and shoot dry matter, total dry matter and root length. Regarding the physiological characteristics, gas exchange, predawn water potential and chlorophyll a, b and total were evaluated. The evaluations took place in four distinct periods: at the beginning of the water treatments, when the plants were in a condition of 100% available water in the soil; at 25 days after the imposition of water deficit (DAIDH); at 33 days after the imposition of water deficit (DAIDH) and at 17 days after the return of irrigation in the non-irrigated treatment. There was a variation among genotypes regarding the evaluated characteristics. There was growth limitation in most of the genotypes evaluated due to water deficit. In the physiological evaluations, a distinction was observed between irrigated and non-irrigated genotypes at 25 DAIDH, where there was a reduction of 37.9, 62.0 and 58.9% in the net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration, respectively. At 33 DAIDH, most non-irrigated genotypes reached predawn water potential below -3MPa, affecting gas exchange. After the return of irrigation, recovery in gas exchange was observed in most of the evaluated genotypes. In general, *Coffea arabica* L. genotypes showed variability in terms of growth and physiological characteristics, indicating different tolerance strategies against water deficit. The genotypes 'Híbrido de Timor UFV 376-12', 'UFV 377-21' and 'UFV 376-31' and the one derived from the crossing between 'BE Wush-Wush' and 'Híbrido de Timor UFV 366-08' stood out, with potential for drought tolerance due to adaptations under water deficit that contributed to the maintenance of water status in the initial growth phase. The main adaptation strategies observed were maintenance of gas exchange and water potential at predawn, reduction in shoot vegetative growth and increase in the root system.

Keywords: Coffee tree. Drought tolerance. Physiology. Morphology.

1 INTRODUÇÃO

O estresse hídrico é uma das restrições mais importantes que afetam a produtividade das culturas de todo o mundo (CANALES *et al.*, 2021). Estudos estimam aumento da temperatura e alterações nas distribuições de chuvas ocasionando períodos de deficit hídrico prolongado (DUBBERSTEIN *et al.*, 2020; MOAT *et al.*, 2017; THIOUNE *et al.*, 2020).

No cafeeiro, as alterações climáticas podem favorecer o ataque de pragas e doenças, tornar regiões impróprias para o cultivo e até mesmo extinguir espécies nativas (DAMATTA; RAMALHO 2006; DAVIS *et al.*, 2012; MOAT *et al.*, 2017; RUIZ-CÁRDENAS, 2015). Dentre as formas de minimizar esses impactos estão o uso da irrigação, sombreamento e utilização de genótipos tolerantes (COLTRI *et al.*, 2019; FARES *et al.*, 2016; DUBBERSTEIN *et al.*, 2018).

Sob baixa disponibilidade hídrica, as funções da planta podem se ajustar por meio de vários mecanismos tais como mudanças no sistema fotossintético e antioxidante, além de aspectos morfológicos como arquitetura da planta e profundidade do sistema radicular (LIU *et al.*, 2020; KAPOOR *et al.*, 2020; PELOSO *et al.*, 2017, MENEZES-SILVA *et al.*, 2017). Os mecanismos e a intensidade de adaptação podem variar entre espécies e genótipos, conferindo a tolerância ou suscetibilidade ao estresse (CANALES *et al.*, 2021).

No Brasil, é ampla a variabilidade fenotípica do cafeeiro, sendo que no Banco Ativo de Germoplasma da EPAMIG, localizado em Patrocínio-MG, possui aproximadamente 1500 acessos. Dentre estes, estão cultivares antigas, tradicionais, materiais exóticos, outras espécies do gênero *Coffea*, além de germoplasma denominado Híbrido de Timor, que tem sido frequentemente utilizado em programas de melhoramento que visam resistência às doenças (CARVALHO *et al.*, 1991; GUEDES *et al.*, 2013). No entanto, poucos estudos têm explorado estes acessos em relação à tolerância a estresses abióticos. Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho identificar genótipos de *Coffea arabica* L. potencialmente tolerantes à deficiência hídrica, por meio da avaliação de características fisiológicas, morfológicas e de crescimento.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material vegetal

Foram utilizados 16 acessos de *Coffea arabica* L. do Banco Ativo de Germoplasma (BAG) da EPAMIG em Patrocínio-MG, selecionados com base em parâmetros de produtividade, qualidade e resistência a doenças, além de duas cultivares, sendo um considerado como tolerante (IPR 100) (CARVALHO *et al.*, 2017) e o outro como sensível (Rubi MG1192) (FREIRE *et al.*, 2013) à deficiência hídrica (TABELA 1).

Tabela 1 - Identificação e genealogia de genótipos do Banco Ativo de Germoplasma da EPAMIG em Patrocínio-MG.

Acesso	Identificação no BAG-EPAMIG	Genealogia
1	MG 451	Mundo Novo x S 795 UFV 335-68
2	MG 282	Híbrido Timor UFV 376-12
3	MG 270 ¹	Híbrido Timor UFV 377-21
4	MG 443	Mundo Novo x S 795 UFV 335-09
5	MG 270 ²	Híbrido Timor UFV 377-21
6	MG 342	Híbrido Timor UFV 439-11
7	MG 364	Híbrido Timor UFV 442-42
8	MG 534	BE 5 Wush-Wush x Híbrido Timor UFV 366-08
9	MG 441	Mundo Novo x S 795 UFV 335-07
10	MG 311	Híbrido Timor UFV 428-02
11	MG 296	Híbrido Timor UFV 408-11
12	MG 263	Catuaí Vermelho
13	MG 279	Híbrido Timor UFV 376-31
14	MG 446	Mundo Novo x S 795 UFV 335-13
15	MG 308	Híbrido de Timor UFV 427- 55
16	MG 176	Amphillo x H. Natural MR 36-349
17	Rubi MG1192	Catuaí e Mundo Novo
18	IPR 100	“Catuaí” x cafeeiro (“Catuaí” x genótipo de café da série ‘BA-10’) portador de genes de <i>C. liberica</i> .

¹ MG 270 bloco 1; ² Seleção de plantas (1, 3 e 6) do acesso MG 270 no bloco 2.

Fonte: Da autora (2021).

O BAG foi instalado em 2005, no Campo Experimental da EPAMIG, localizado em Patrocínio-MG - região do Alto Paranaíba, situada a 18°59'26" de latitude Sul, 48°58'95" de longitude Oeste e altitude local de aproximadamente mil metros. O solo é do tipo Latossolo Vermelho-amarelo e a topografia é plana, com ligeira inclinação (SANTOS *et al.*, 2013). O clima do município de Patrocínio é classificado como Clima Subtropical Úmido, com inverno seco e estação chuvosa no verão (Cwb), segundo Koppen (ALVARES *et al.*, 2013).

2.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados e o ensaio foi constituído por 36 tratamentos, em esquema fatorial 18x2 (genótipos x tratamentos hídricos; G x TH). Para cada tratamento foram consideradas quatro repetições e cada parcela experimental foi constituída por uma planta.

2.3 Formação das mudas e tratamento hídrico

Para a formação das mudas, as sementes dos acessos selecionados foram colhidas no ano de 2017 e germinadas em areia até atingirem o estágio de emissão de folhas cotiledonares ('orelha de onça'), quando foram transplantadas para tubetes de 120 ml, contendo substrato para plantas a base de casca de pinus, turfa, vermiculita expandida, enriquecido com macro e micronutrientes da marca Tropstrato HT. Posteriormente, foram mantidas em viveiro até apresentarem quatro pares de folhas verdadeiras e aclimatadas.

Após esse período, as mudas foram transferidas para vasos de polietileno de 20 litros, contendo o substrato de uma mistura de 3 partes de subsolo, 1 parte de areia e 1 parte de esterco bovino (3:1:1). As mudas foram mantidas em casa de vegetação por um período de onze meses, na Estação Experimental da EPAMIG em Lavras-MG, município localizada na latitude de 21°14'30'' Sul e longitude de 45°00'10'' Oeste, na altitude de 918,84 m (Coordenadas da Estação Climatológica Principal de Lavras, vinculada ao INMET – Instituto Nacional de Meteorologia).

A adubação foi realizada de acordo com a análise do substrato, seguindo as recomendações de Guimarães *et al.* (1999). Os tratamentos fitossanitários foram realizados preventivamente para o controle das principais pragas e doenças da cultura na região.

As plantas foram irrigadas de forma a manter o solo com 100% de água disponível por onze meses, sendo que em abril de 2019 foram submetidas ao tratamento hídrico. No primeiro tratamento hídrico as plantas foram mantidas com o solo a 100% da água disponível de abril de 2019 até o final do período experimental (Irigado - I) e no segundo tratamento houve suspensão total da irrigação (Não irrigado - NI) até que a maioria das plantas não irrigadas atingissem o potencial hídrico de antemanhã de -3MPa (BRUM *et al.*, 2013). Quando as plantas atingiram esse potencial hídrico, o que ocorreu após 33 dias da imposição do estresse, retornou-se à irrigação, mantendo-as novamente com 100% de água disponível no solo.

2.4 Obtenção de dados microclimáticos

O monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar no interior da casa de vegetação foi realizado diariamente durante o período experimental com auxílio do aparelho da marca ACU-RITE.

2.5 Avaliações morfológicas e crescimento

Após iniciado o tratamento hídrico, foram avaliados a altura, os diâmetros de copa e de caule, ângulo de inserção do ramo plagiotrópico, número de nós do ramo ortotrópico e área foliar.

A altura das plantas (ALT – cm) e o diâmetro de copa (DCO – cm) foram determinados com auxílio de régua graduada. Para a altura, considerou-se o ramo ortotrópico, a partir do colo das plantas, até a inserção do último nó. Já para o diâmetro de copa (DCO - cm) considerou-se o comprimento do maior ramo plagiotrópico e o valor obtido foi multiplicado por 2. O diâmetro de caule (DCA – mm) foi aferido na base do ramo ortotrópico, com auxílio de um paquímetro digital. Para a obtenção do ângulo de inserção do ramo plagiotrópico (ANG - °) utilizou-se transferidor de polietileno e considerou-se o ângulo formado entre o ramo ortotrópico e o primeiro ramo plagiotrópico. O número de nós (NNOS) foi quantificado no ramo ortotrópico. A área foliar (AF – cm²) foi determinada pelas dimensões do retângulo circunscrito aos limbos foliares (BARROS *et al.*, 1973) em todas as folhas das plantas. Posteriormente o resultado obtido foi ajustado pela equação:

$$Y = 0.667. X \quad (1)$$

Onde:

Y – representa a área foliar;

X – área do retângulo circunscrito ao limbo foliar (produto entre comprimento e largura da folha) (BARROS *et al.*, 1973).

Ao final do período experimental (50 dias após o início dos tratamentos hídricos) as características ALT, DCO, DCA e NNOS foram novamente avaliadas e determinou-se a diferença entre o início e o final do período experimental. Além disso, foram obtidos o peso da matéria seca da parte aérea das plantas (MSPA – g), o peso da matéria seca da raiz (MSR – g), peso da matéria seca total (MST g) (soma de MSPA + MSR) e comprimento da raiz pivotante (CR – cm). Para tanto, o sistema radicular foi lavado e, em seguida, separou-se a parte aérea do sistema radicular das plantas. Posteriormente, foram mantidos em estufa com circulação forçada de ar, à temperatura de 70 °C durante 72 horas. A aferição do peso da matéria seca foi realizada com auxílio de balança de precisão. Para a obtenção do comprimento da raiz pivotante utilizou-se régua graduada.

2.6 Avaliações fisiológicas

As avaliações fisiológicas ocorreram em quatro períodos distintos: a) ao iniciar o tratamento hídrico, quando as plantas estavam em condição de 100% de água disponível no solo; b) aos 25 dias após a imposição do déficit hídrico (DAIDH), quando os genótipos apresentaram variabilidade em relação ao estresse hídrico; c) aos 33 dias após a imposição do déficit hídrico (DAIDH), quando a maioria dos genótipos submetidos ao déficit (tratamento não irrigado) chegaram ao potencial de antemanhã de -3 MPa; e d) aos 17 dias após o retorno da irrigação do tratamento hídrico não irrigado, com a finalidade de verificar a recuperação dos genótipos.

Para as avaliações foram utilizadas folhas completamente expandidas do terceiro ou quarto par do ramo plagiotrópico, na parte mediana da planta.

2.7 Trocas gasosas

A avaliação de trocas gasosas foi realizada no período entre 8 e 11 horas da manhã, sob luz artificial ($1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), com a auxílio de um sistema portátil de análise de gases por infravermelho (IRGA LICOR – 6400XT), onde obteve-se a taxa fotossintética líquida ($A - \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática ($g_s - \text{mol H}_2\text{O m}^{-1} \text{s}^{-1}$), taxa transpiratória ($E - \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), eficiência instantânea no uso da água ($\text{EUA} - \mu\text{mol CO}_2 / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (A/E) deficit de pressão de vapor (DPV - hPa) e temperatura foliar ($T_{\text{leaf}} - ^\circ\text{C}$).

2.8 Potencial hídrico na antemanhã

Para determinação do potencial hídrico utilizou-se uma câmara de pressão tipo Scholander (PMS Instruments Plant Moisture- Modelo 1000) e as avaliações foram realizadas antes do amanhecer (potencial hídrico na antemanhã).

2.9 Índices de clorofilas

A determinação indireta dos teores relativos das clorofilas a, b e total foram obtidas por meio do medidor portátil de clorofila ClorofiLOG (Falker Automação Agrícola, Brasil), que fornece valores denominados índices de clorofila Falker (ICF) proporcionais à absorvância das clorofilas (BARBIERI JÚNIOR *et al.*, 2012).

2.10 Análises estatísticas

As análises dos dados foram realizadas no programa Genes (CRUZ, 2013) e as médias obtidas foram comparadas entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade.

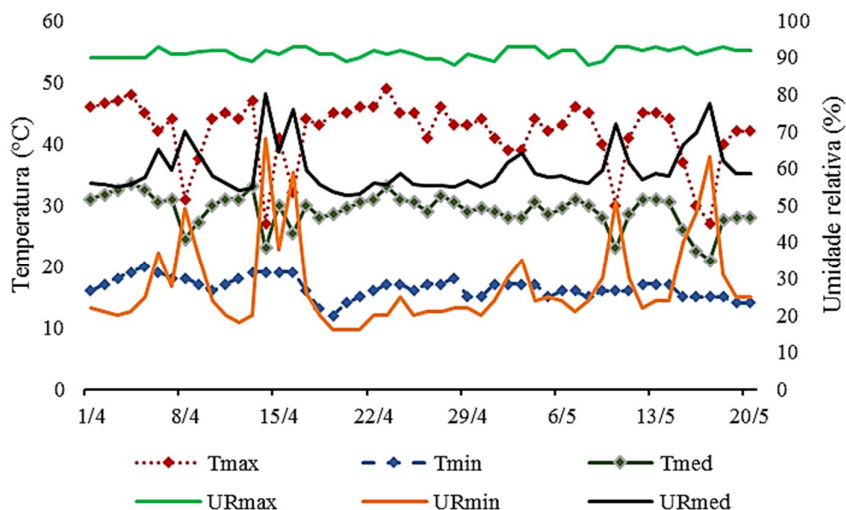
Para estudo da correlação entre as características avaliadas utilizou-se as matrizes de correlação fenotípicas, que foram obtidas e analisadas por meio de redes de correlação ponderadas. A partir dos dados morfológicos e de crescimento, obtidos antes da imposição do deficit hídrico, dados do peso da matéria seca obtidos após a imposição do deficit hídrico e dados fisiológicos dos genótipos submetidos a suspensão total da irrigação (NI), elaborou-se duas redes de correlações das avaliações aos 25 DAIDH e aos 33 DAIDH. Esta análise facilita a visualização e interpretação dos resultados, bem como auxilia fatores comuns utilizados como critérios de seleção (BARBOSA *et al.*, 2019). A espessura e a intensidade da cor das bordas foram controladas por aplicação de um valor de corte igual a 0,5 (SILVA; CECON; PUIATTI, 2015), o que significa que apenas $|rij| \geq 0,5$ têm as suas linhas destacadas pela espessura. As correlações fenotípicas positivas foram representadas por linhas verdes e as negativas por linhas vermelhas. Correlações positivas indicam a tendência de uma característica aumentar quando a outra aumenta; correlações negativas indicam a tendência de uma característica aumentar enquanto a outra diminui.

3 RESULTADOS

3.1 Dados microclimáticos

A condição climática na casa de vegetação no período experimental está representada na Figura 1. No início do período experimental (01/04) a temperatura e a umidade relativa média foram de 31°C e 56%, respectivamente. Aos 25 DAIDH (26/04), quando os genótipos avaliados apresentaram comportamento distintos em relação ao estresse hídrico, a temperatura máxima atingiu 41 °C, a média foi de 29 °C e a umidade relativa mínima do ar foi de 21% (FIGURA 1).

Figura 1 - Temperatura (T °C) e umidade relativa (UR%) do ar no interior da casa de vegetação durante o período experimental.



Fonte: Da autora (2021).

Aos 33 DAIDH (03/05), quando a maioria dos genótipos submetidos ao deficit (tratamento não irrigado) chegaram ao potencial de antemanhã de -3 MPa, a temperatura média foi de 29 °C e a umidade relativa de 64%. Interessante observar que a temperatura máxima registrada no período experimental oscilou por volta de 42 °C (FIGURA 1).

Após a reidratação dos genótipos, no dia 20/05, a temperatura e a umidade relativa média registrada foram de 28 °C e 59%, respectivamente (FIGURA 1).

3.2 Características morfológicas e de crescimento

As características morfológicas dos 18 genótipos avaliados antes da imposição do tratamento hídrico estão apresentadas na Tabela 2. Não foi observada diferença significativa para o tratamento hídrico e para a interação entre genótipo e tratamento hídrico. Verificou-se diferença significativa entre os genótipos para todas as características morfológicas avaliadas, evidenciando as características inerentes de cada material, visto que todos estavam nas mesmas condições de disponibilidade hídrica.

Tabela 2 - Valores médios de características morfológicas e de crescimento ⁽¹⁾ avaliadas em genótipos de *Coffea arabica* L. obtidos antes da imposição do deficit hídrico.

Genótipo	AF cm ²	ALT cm	DCA cm	DCO cm	NNOS unid	ANG °
1	1970.25 a	39.25 a	0.78 a	33.13 b	4.25 c	60 b
2	1394.8 b	48.25 a	0.60 c	39.63 a	4.50 b	73 a
3	2129.35 a	41.38 a	0.70 b	44.50 a	5.38 a	54 b
4	2027.57 a	43.75 a	0.76 a	48.25 a	4.63 b	67 a
5	2158.85 a	43.90 a	0.70 b	47.88 a	4.63 b	60 b
6	1778.9 a	42.39 a	0.69 b	43.38 a	4.63 b	60 b
7	1749.12 a	39.63 a	0.69 b	39.75 a	4.00 c	64 a
8	1375.06 b	43.00 a	0.70 b	46.75 a	4.88 b	60 b
9	1561.69 b	41.50 a	0.66 b	37.68 a	4.38 c	61 b
10	1038.96 c	35.63 b	0.64 c	32.63 b	3.25 c	55 b
11	2592.00 a	45.19 a	0.82 a	42.75 a	5.75 a	68 a
12	651.83 c	29.25 c	0.56 c	24.25 b	4.13 c	57 b
13	1542.19 b	32.19 b	0.62 c	29.13 b	4.25 c	59 b
14	2169.54 a	43.75 a	0.72 b	45.75 a	4.50 b	67 a
15	876.84 c	32.00 b	0.52 c	26.38 b	4.00 c	57 b
16	1123.22 c	34.25 b	0.55 c	29.75 b	3.50 c	50 b
17	1192.64 c	24.56 c	0.56 c	22.88 b	3.88 c	63 a
18	1725.14 a	25.48 c	0.51 c	24.25 b	4.25 c	57 b

(¹): AF – área foliar, ALT – altura inicial, DCA – diâmetro de caule inicial, DCO – diâmetro de copa inicial, NNOS – número de nós, ANG – ângulo de inserção do ramo plagiotrópico. 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 probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

Quanto à área foliar, os genótipos foram divididos em 3 grupos de acordo com o teste de agrupamento Scott-Knott, sendo o grupo de maior área foliar composto pelas plantas dos genótipos 1, 3, 4, 5, 6, 7, 11, 14 e 18. Embora esses genótipos apresentassem maior área foliar, somente as plantas dos genótipos 4 e 11 apresentaram essa característica associada a maiores valores médios de altura, diâmetro de caule e de copa. Em contrapartida, as plantas dos genótipos 10, 12, 13, 15 e 16 apresentaram menores valores médios das características morfológicas e de crescimento avaliadas (TABELA 2).

Em relação ao número de nós do ramo ortotrópico, destacaram-se as plantas dos genótipos 3 e 11, que também permaneceram no grupo de maior valor médio para altura e diâmetro de copa (TABELA 2).

No que se refere ao ângulo de inserção dos ramos plagiotrópicos, observou-se maiores valores médios nas plantas dos genótipos 2, 4, 7, 11, 14 e 17 em relação aos demais (TABELA 2).

Ao final do período de imposição do deficit hídrico, observou-se diferentes respostas de crescimento nos genótipos avaliados. Em relação à altura (ALT), o diâmetro de caule, diâmetro de copa das plantas e para a diferença entre o diâmetro de caule inicial e final (Dcaule) verificou-se diferença significativa apenas para genótipo (TABELA 3). Sendo que as plantas dos genótipos 3, 4, 5, 11 e 14 apresentaram maior altura, diâmetro de caule e diâmetro de copa ao final do período experimental. Em contrapartida, as plantas dos genótipos 12, 13, 15, 17 e 18 apresentaram menores valores médios para essas características (TABELA 3).

Quando analisada a diferença entre os valores iniciais e finais dos genótipos, verificou-se interação significativa entre os genótipos e o tratamento hídrico para as variáveis Dalt e Dnos (TABELA 3). Sob condição de deficit hídrico, foi possível observar limitação no crescimento nas plantas dos genótipos 4, 5, 8 e 9 em relação a diferença entre a altura inicial e final das plantas (Dalt), número de nós final (NNOS) e na diferença entre o número de nós inicial e final (Dnos). Por outro lado, as plantas dos genótipos 3, 11, 16 e 18 mantiveram o crescimento sob as mesmas condições (TABELA 3).

Tabela 3 - Valores médios de características morfológicas ⁽¹⁾ avaliadas em genótipos de *Coffea arabica* L. obtidos após a imposição do deficit hídrico.

Genótipo	ALT	DCA	DCO	NNOS		Dalt		Dcaule	Dnos	
				I	NI	I	NI		I	NI
1	47.86 b	1.13 a	63.58 a	7.50 b A	8.50 a A	12.73 b A	4.50 a B	0.36 a	3.50 b A	4.00 a A
2	54.71 a	0.97 b	55.30 b	8.50 a A	8.00 a A	12.13 b A	0.80 a B	0.37 a	4.00 a A	3.50 a A
3	54.89 a	1.06 a	71.40 a	8.50 a A	8.00 a A	16.43 b A	10.60 a A	0.36 a	3.25 b A	2.50 a A
4	53.20 a	1.21 a	76.33 a	9.75 a A	7.75 a B	15.55 b A	6.23 a B	0.45 a	5.25 a A	3.00 a B
5	59.30 a	1.24 a	72.78 a	9.00 a A	7.00 a B	25.30 a A	5.50 a B	0.55 a	4.25 a A	2.50 a B
6	49.76 b	1.09 a	62.65 a	8.25 a A	6.75 a A	12.40 b A	2.35 a B	0.38 a	3.50 b A	2.25 b A
7	44.86 b	1.09 a	61.48 a	8.50 a A	5.50 b B	4.63 c A	5.85 a A	0.40 a	4.50 a A	1.50 b B
8	47.18 b	0.93 b	66.18 a	8.00 a A	5.25 b B	9.75 c A	0.63 a B	0.24 b	3.00 b A	0.50 b B
9	47.35 b	0.97 b	59.03 a	9.00 a A	6.25 b B	10.05 c A	2.40 a B	0.31 a	4.50 a A	2.00 b B
10	41.36 c	0.99 b	53.00 b	6.75 b A	5.00 b B	7.28 c A	4.33 a A	0.35 a	3.50 b A	1.75 b B
11	52.80 a	1.06 a	60.48 a	9.00 a A	7.50 a A	9.98 c A	5.25 a A	0.25 b	3.00 b A	2.00 b A
12	31.36 d	0.64 c	40.93 b	7.50 b A	5.50 b B	4.03 c A	0.20 a A	0.12 b	3.25 b A	1.50 b B
13	35.39 d	0.96 b	49.43 b	7.75 b A	6.00 b B	4.73 c A	1.68 a A	0.36 a	3.25 b A	2.00 b A
14	52.26 a	1.11 a	70.70 a	9.00 a A	7.75 a A	13.73 b A	3.48 a B	0.39 a	4.25 a A	3.50 a A
15	34.54 d	0.72 c	36.93 b	6.50 b A	5.00 b A	3.85 c A	2.73 a A	0.24 b	2.50 b A	1.00 b B
16	39.31 c	0.93 b	49.13 b	6.00 b A	7.00 a A	4.38 c A	5.75 a A	0.37 a	2.50 b A	3.50 a A
17	30.63 d	0.88 b	39.45 b	7.50 b A	6.00 b A	5.48 c A	6.65 a A	0.32 a	4.00 a A	1.75 b B
18	29.44 d	0.86 b	45.23 b	7.25 b A	7.25 a A	4.90 c A	3.10 a A	0.36 a	3.00 b A	3.00 a A

⁽¹⁾: ALT – altura final, Dalt – diferença entre a altura inicial e final, DCA – diâmetro de caule final, Dcaule – diferença entre diâmetro de caule inicial e final, DCO – diâmetro de copa final, NNOS – número de nós final, Dnos – diferença entre o n° de nós inicial e final. I - Irrigado, NI – Não irrigado. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna comparam os genótipos e maiúscula na linha comparam tratamento hídrico dentro de cada genótipo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

A diferença entre o diâmetro de copa inicial e final apresentou significância apenas para o tratamento hídrico, onde as plantas do tratamento que foi mantido irrigado tiveram maior diâmetro de copa (TABELA 4).

Tabela 4 - Diferença entre diâmetro de copa inicial e diâmetro de copa final de genótipos de *Coffea arabica* L.

TH	DDCO
I	25.53 a
NI	20.04 b

TH – Tratamento hídrico, I - Irrigado, NI - Não irrigado. 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 probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

O deficit hídrico afetou a produção de matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca da raiz (MSR) e matéria seca total (MST) das plantas dos genótipos 4, 5, 7, 8, 11, 12 e 14 em relação aos demais. Já nas plantas dos genótipos 1, 3, 10, 15, 16 e 17, essa redução não foi observada. Por outro lado, as plantas dos genótipos 2 e 6 mesmo apresentando redução do peso da matéria seca da parte aérea mantiveram o crescimento radicular (TABELA 5). Menor comprimento da raiz (CR) foi observado nas plantas dos genótipos 1, 4, 6, 8, 12 e 16 em relação aos demais (TABELA 5).

Observou-se variabilidade na relação entre raiz e parte aérea (RPA) dos genótipos quando irrigados e quando submetidos ao deficit hídrico. Sob condição irrigada as plantas dos genótipos 4, 9, 12, 13, 17 e 18 apresentaram maior RPA em relação aos demais. Já as plantas dos genótipos 2, 7, 8, 12, 17 e 18 permaneceram no grupo de maior RPA em situação de deficit hídrico. Com destaque para as plantas do genótipo 2, que apresentaram maior RPA, quando submetido ao deficit hídrico do que quando irrigado, o que demonstra investimento no sistema radicular em situação de deficit hídrico (TABELA 5).

Tabela 5 – Peso da matéria seca da parte aérea (MSPA - g), peso da matéria seca da raiz (MSR – g), peso da matéria seca total (MST – g), comprimento de raiz (CR – cm) e relação entre raiz e parte aérea (RPA) de genótipos de *Coffea arabica* L. obtidos após a imposição do deficit hídrico.

Genótipo	MSPA		MSR		MST		CR	RPA	
	I	NI	I	NI	I	NI		I	NI
1	37.41 b A	24.36 a A	11.29 d A	7.77 a A	48.70 b A	32.13 a A	34.94 b	0.26 b A	0.32 b A
2	39.19 b A	12.76 b B	7.56 d A	6.68 a A	46.75 b A	19.44 b B	37.16 a	0.19 b B	0.50 a A
3	31.65 b A	34.34 a A	14.14 c A	11.21 a A	45.78 b A	45.55 a A	39.46 a	0.46 b A	0.33 b A
4	64.45 a A	35.03 a B	34.10 a A	11.55 a B	98.55 a A	46.58 a B	34.60 b	0.63 a A	0.33 b B
5	67.69 a A	25.16 a B	28.00 a A	9.23 a B	95.69 a A	34.39 a B	41.31 a	0.41 b A	0.36 b A
6	44.23 b A	23.45 a B	14.05 c A	8.69 a A	58.28 b A	32.13 a B	34.63 b	0.38 b A	0.37 b A
7	54.88 a A	20.76 b B	21.89 b A	10.47 a B	76.76 a A	31.22 a B	38.88 a	0.41 b A	0.51 a A
8	56.75 a A	12.70 b B	18.73 c A	5.37 a B	75.48 a A	18.06 b B	34.20 b	0.35 b A	0.42 a A
9	27.35 b A	15.09 b A	14.92 c A	5.08 a B	42.27 b A	20.17 b A	38.31 a	0.57 a A	0.34 b B
10	22.92 b A	12.39 b A	8.63 d A	4.28 a A	31.55 b A	16.67 b A	37.78 a	0.37 b A	0.36 b A
11	62.89 a A	25.50 a B	28.34 a A	7.85 a B	91.23 a A	33.35 a B	38.71 a	0.44 b A	0.35 b A
12	30.49 b A	5.94 b B	15.20 c A	2.83 a B	45.68 b A	8.77 b B	33.60 b	0.50 a A	0.48 a A
13	34.82 b A	18.45 b A	18.07 c A	4.57 a B	52.88 b A	23.02 b B	38.84 a	0.52 a A	0.26 b B
14	64.48 a A	30.37 a B	21.04 b A	9.47 a B	85.53 a A	39.84 a B	36.94 a	0.32 b A	0.31 b A
15	20.16 b A	11.37 b A	8.01 d A	4.07 a A	28.17 b A	15.44 b A	36.79 a	0.42 b A	0.37 b A
16	19.88 b A	15.92 b A	6.47 d A	4.74 a A	26.35 b A	20.66 b A	31.38 b	0.32 b A	0.30 b A
17	21.43 b A	17.02 b A	12.77 c A	8.31 a A	34.20 b A	25.33 b A	38.19 a	0.58 a A	0.50 a A
18	24.14 b A	14.87 b A	15.06 c A	6.99 a B	39.20 b A	21.86 b A	40.31 a	0.61 a A	0.46 a A

I - Irrigado, NI - Não irrigado. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna comparam os genótipos e maiúscula na linha tratamento hídrico dentro de cada genótipo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

3.3 Potencial hídrico, trocas gasosas e índices de clorofilas Falker

Na primeira avaliação, quando todas as plantas estavam em condição de 100% de água disponível no solo, não houve interação significativa entre genótipo e tratamento hídrico. No entanto, foi observada variabilidade entre os genótipos avaliados, sendo que as plantas dos genótipos 1, 7, 8 e 12 apresentaram maiores valores médios de potencial hídrico de antemanhã em comparação aos demais (TABELA 6).

Quanto às trocas gasosas as plantas dos genótipos 7 e 11 se mantiveram no grupo de maior A associados a menor E, mesmo com maiores valores médios de DPV e Tleaf. Na eficiência do uso da água as plantas dos genótipos 1 e 13 se sobressaíram em relação aos demais (TABELA 6).

As plantas dos genótipos 5, 6, 9 e 13 permaneceram no grupo com maiores índices de clorofilas a, b e total (TABELA 6).

Tabela 6 - Potencial hídrico na antemanhã (MPa), taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (gs), taxa transpiratória (E), eficiência do uso da água (EUA), deficit de pressão de vapor (DPV), temperatura foliar (Tleaf), índices de clorofilas Falker a, b e total (Cla, Clb, CIT) de genótipos de *Coffea arabica* L. antes da imposição do deficit hídrico.

Genótipo	MPa	A	gs	E	EUA	DPV	Tleaf	Cla	Clb	CIT
1	-0.73 a	7.36 c	0.033 e	1.16 g	6.38 a	3.15 b	33.25 b	423.38 b	186.50 c	609.88 b
2	-0.84 b	8.50 a	0.060 a	1.77 b	4.81 c	2.49 c	31.10 d	450.63 a	218.75 b	669.38 a
3	-1.00 c	8.73 a	0.050 c	2.00 a	4.23 d	3.49 a	33.87 b	430.88 a	179.88 c	610.75 b
4	-0.80 c	7.52 b	0.053 b	1.55 d	4.86 c	3.17 b	33.51 b	418.63 b	180.75 c	599.38 b
5	-0.95 b	6.97 c	0.040 d	1.25 f	5.60 b	2.59 c	31.23 d	444.50 a	228.50 a	673.00 a
6	-0.83 b	7.58 b	0.054 b	1.71 c	4.43 d	3.24 b	34.03 b	463.25 a	226.12 a	689.38 a
7	-0.65 a	8.83 a	0.047 c	1.69 c	5.24 b	3.57 a	35.13 a	399.38 b	156.88 d	556.25 c
8	-0.66 a	7.30 c	0.052 b	1.77 b	4.11 d	2.86 c	32.23 c	402.38 b	183.25 c	585.63 b
9	-0.98 c	8.20 a	0.038 d	1.54 d	5.38 b	2.84 c	32.57 c	450.75 a	233.63 a	684.38 a
10	-0.86 b	7.75 b	0.038 d	1.42 e	5.45 b	3.10 b	33.19 b	430.25 a	186.63 c	616.88 b
11	-0.85 b	8.63 a	0.056 b	1.55 d	5.58 b	3.43 a	34.51 a	446.63 a	208.63 b	655.25 a
12	-0.74 a	7.15 c	0.042 d	1.48 e	4.86 c	3.01 b	32.60 c	400.50 b	141.75 e	542.25 c
13	-0.91 c	7.12 c	0.032 e	1.11 g	6.47 a	3.32 a	33.58 b	441.13 a	229.63 a	670.75 a
14	-1.16 d	7.60 b	0.043d	1.51 d	5.01 c	3.33 a	34.32 a	431.88 a	180.13 c	612.00 b
15	-0.78 b	7.92 b	0.045 c	1.45 e	5.48 b	2.73 c	32.66 c	390.50 b	165.63 d	556.13 c
16	-1.06 d	7.91 b	0.041 d	1.67 c	4.75 c	3.05 b	33.22 b	436.25 a	186.13 c	622.38 b
17	-1.01 c	8.75 a	0.046 c	1.57 c	5.58 b	3.16 b	33.59 b	415.38 b	168.25 d	583.63 b
18	-0.79 b	7.34 c	0.048 c	1.55 d	4.76 c	2.85 c	32.75 c	445.50 a	215.25 b	660.75 a

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 probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

Aos 25 dias após a imposição do déficit hídrico foi possível observar o efeito da restrição hídrica na maioria dos genótipos avaliados. Maior déficit de pressão de vapor foi verificado nas plantas não irrigadas (TABELA 7). Quanto à temperatura foliar (Tleaf) não houve diferença significativa para genótipos, tratamento hídrico e na interação entre esses fatores.

Tabela 7 - Deficit de pressão de vapor (DPV) de genótipos de *Coffea arabica* L. submetidos ao déficit hídrico.

TH	DPV
I	3.29 b
NI	3.36 a

TH - Tratamento hídrico, I – Irrigado, NI - Não irrigado. 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 probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

De maneira geral, houve redução no potencial hídrico de antemanhã, taxa fotossintética líquida, condutância estomática, taxa transpiratória e aumento da eficiência do uso da água nas plantas dos genótipos não irrigados em relação ao controle irrigado. Em relação ao potencial hídrico de antemanhã se destacaram as plantas dos genótipos 13 e 16, que não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos hídricos. Quanto às trocas gasosas, de forma geral houve redução de 37.9, 62.0 e 58.9% na A, gs e E, respectivamente nas plantas dos genótipos não irrigados em relação ao controle irrigado. Durante o período de estresse hídrico, os genótipos 3, 4, 6, 7, 11 e 15 apresentaram redução no potencial hídrico de antemanhã associada a redução na A, gs e E, em relação ao controle irrigado, dessa forma sendo os mais afetados pelo déficit hídrico aos 25 DAIDH. Por outro lado, a taxa fotossintética líquida não foi afetada nas plantas dos genótipos 1, 2, 8, 12 e 16, que mantiveram maiores valores médios de potencial hídrico de antemanhã quando não irrigados. Já as plantas do genótipo 5 mantiveram A semelhante ao controle irrigado, mesmo sob baixo potencial hídrico de antemanhã (TABELA 8).

Houve incremento na eficiência do uso da água nos genótipos não irrigados, em relação ao controle irrigado. Observou-se aumento dessa característica, no tratamento não irrigado, nas plantas dos genótipos 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14 e 17 (TABELA 8).

Quanto aos índices de clorofila a, b e total observou-se que o tratamento hídrico influenciou as plantas dos genótipos 1, 3 e 5, que apresentaram menores valores médios em relação ao tratamento irrigado (TABELA 8).

Nas plantas mantidas em condição de substrato com 100% de capacidade de campo, observou-se variabilidade para A, gs e E, sendo observado maiores valores médios dessas

características nos genótipos 6 e 10; e menores valores médios para os genótipos 1 e 16 (TABELA 8).

Tabela 8 - Potencial hídrico na antemanhã (MPa), taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (gs), taxa transpiratória (E), eficiência do uso da água (EUA), índices de clorofilas Falker a, b e total (Cla, Clb, CIT) de genótipos de *Coffea arabica* L. aos 25 dias após a imposição do deficit hídrico.

Genótipo	MPa		A		gs		E		EUA		Cla		Clb		CIT	
	I	NI	I	NI	I	NI	I	NI	I	NI	I	NI	I	NI	I	NI
1	-0.84 a A	-1.79 a B	4.71 c A	4.93 a A	0.032 c A	0.021 b B	1.25 f A	0.82 b B	3.81 a A	6.20 b A	446 a A	411 c B	269 a A	202 c B	716 a A	614 c B
2	-0.86 a A	-2.17 a B	6.56 b A	5.17 a A	0.033 c A	0.017 c B	1.16 f A	0.64 c B	5.72 a B	8.49 a A	389 c A	402 c A	187 b A	206 c A	577 c A	615 c A
3	-0.96 a A	-2.60 b B	5.90 b A	2.19 b B	0.030 c A	0.006 c B	1.11 f A	0.31 d B	5.38 a B	9.77 a A	444 a A	391 c B	270 a A	173 c B	714 a A	566 c B
4	-0.69 a A	-2.67 b B	7.44 a A	2.46 b B	0.044 b A	0.010 c B	1.84 b A	0.41 d B	4.06 a A	6.49 b A	436 b A	435 b A	252 a A	244 b A	688 b A	683 b A
5	-1.01 a A	-2.38 b B	5.75 b A	5.26 a A	0.027 c A	0.016 c B	1.31 e A	0.71 c B	4.49 a B	7.45 b A	452 a A	421 b B	268 a A	203 c B	743 a A	623 c B
6	-0.76 a A	-2.60 b B	7.94 a A	3.26 b B	0.059 a A	0.011 c B	2.06 a A	0.39 d B	3.86 a B	9.48 a A	432 b B	455 a A	244 a B	326 a A	658 b B	780 a A
7	-0.67 a A	-2.40 b B	5.80 b A	3.89 b B	0.035 c A	0.013 c B	1.22 f A	0.56 c B	4.83 a B	8.23 a A	391 c B	445 a A	238 a A	264 b A	576 c B	755 a A
8	-0.71 a A	-1.83 a B	6.13 b A	4.85 a A	0.044 b A	0.017 c B	1.54 d A	0.62 c B	3.99 a B	8.05 a A	452 a A	429 b B	271 a A	248 b A	724 a A	679 b B
9	-0.55 a A	-1.85 a B	7.77 a A	4.22 a B	0.056 a A	0.012 c B	1.73 c A	0.41 d B	4.51 a B	11.41 a A	440 a A	423 b A	278 a A	216 c B	719 a A	641 c B
10	-0.65 a A	-1.78 a B	8.00 a A	4.19 a B	0.061 a A	0.012 c B	2.08 a A	0.48 d B	3.85 a B	9.82 a A	390 c A	400 b A	162 b A	184 c A	553 c A	585 c A
11	-0.51 a A	-2.90 b B	7.52 a A	3.34 b B	0.056 a A	0.012 c B	1.87 b A	0.49 d B	4.09 a B	6.97 b A	440 a A	430 b A	301 a A	248 b B	742 a A	680 b A
12	-0.85 a A	-1.95 a B	6.34 b A	4.92 a A	0.035 c A	0.026 b B	1.25 f A	1.03 a B	5.11 a A	5.38 b A	453 a A	421 b B	235 a A	220 c A	690 b A	642 c A
13	-1.18 a A	-1.76 a A	8.07 a A	5.14 a B	0.050 b A	0.015 c B	1.34 e A	0.60 c B	5.98 a B	9.77 a A	427 b A	431 b A	239 a A	250 b A	668 b A	683 b A
14	-0.87 a A	-2.06 a B	7.81 a A	3.91 b B	0.042 b A	0.014 c B	1.49 e A	0.38 d B	5.35 a B	10.54 a A	426 b A	412 c A	263 a A	225 c A	689 b A	638 c A
15	-0.58 a A	-1.89 a B	6.41 b A	3.84 b B	0.031 c A	0.014 c B	1.11 f A	0.51 d B	5.79 a A	8.11 a A	418 b A	413 c A	213 b A	226 c A	629 c A	638 c A
16	-1.13 a A	-1.55 a A	3.70 c A	4.78 a A	0.017 d A	0.024 b A	0.62 g B	0.81 b A	6.23 a A	5.87 b A	380 c B	436 c A	198 b A	235 b A	603 c B	669 b A
17	-0.78 a A	-2.26 b B	8.71 a A	4.17 a B	0.056 a A	0.012 c B	1.94 b A	0.48 d B	4.51 a B	9.25 a A	434 b A	428 c A	242 a A	248 b A	677 b A	678 b A
18	-0.85 a A	-2.33 b B	7.27 a A	5.13 a B	0.044 b A	0.034 a B	1.55 d A	1.22 a B	4.70 a A	4.38 b A	437 b A	422 c A	228 a A	239 b A	660 b A	662 b A

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna comparam os genótipos e maiúscula na linha comparam tratamento hídrico dentro de cada genótipo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

Na terceira avaliação, aos 33 dias após a imposição do deficit hídrico, a maioria dos genótipos mantidos sem irrigação, chegou a um potencial hídrico de antemanhã inferior a -3 MPa. Não houve diferença significativa para genótipo (G) e para a interação G x TH nas características de DPV e Tleaf. Observou-se apenas maiores valores médios no tratamento não irrigado (TABELA 9).

Tabela 9 - Deficit de pressão de vapor (DPV) e temperatura foliar (Tleaf) de genótipos de *Coffea arabica* L. submetidos ao deficit hídrico.

TH	DPV	Tleaf
I	2.51 b	28.64 b
NI	2.66 a	28.87 a

TH – Tratamento hídrico, I- Irrigado. 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 probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

Quanto ao potencial hídrico de antemanhã (MPa), maiores valores médios foram observados, para o tratamento não irrigado, nas plantas dos genótipos 9, 10, 15 e 16, seguido pelas plantas dos genótipos 4, 12, 13 e 17 com valores intermediários. Os demais genótipos foram mais afetados pelo deficit hídrico e permaneceram com valores entre -4.10 e -5.13 MPa (TABELA 10).

No que se refere às trocas gasosas, observou-se uma redução de 46.97% na taxa fotossintética dos genótipos não irrigados em relação aos mantidos em capacidade de campo. Sendo que as plantas do genótipo 3 foi o mais afetado com redução de 79% na A, quando comparado ao controle irrigado, permanecendo isolado no grupo com a menor A. As plantas dos genótipos 4, 6, 7, 10 e 11 permaneceram no segundo grupo, com menor A, com variação entre 3.26 e 4.19 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Destacaram-se as plantas dos genótipos 2, 8, 9, 12 e 13 que permaneceram no grupo de maiores valores médios de A, gs e E (TABELA 10), mesmo com baixo potencial hídrico antemanhã (-2.95 a -4.55 MPa). A eficiência do uso da água permaneceu com maiores valores médios para o tratamento não irrigado, em relação ao irrigado, com exceção das plantas do genótipo 18 (TABELA 10).

O deficit hídrico também afetou os índices de clorofilas a, b e total das plantas dos genótipos 10, 11 e 14, que apresentaram menores valores médios em relação ao tratamento irrigado (TABELA 10).

Tabela 10 - Potencial hídrico na antemanhã (MPa), taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (gs), taxa transpiratória (E), eficiência do uso da água (EUA), índices de clorofilas Falker a, b e total (Cla, Clb, CIT) de genótipos de *Coffea arabica* L. aos 33 dias após a imposição do déficit hídrico.

Gen	MPa		A		gs		E		EUA		Cla		Clb		CIT	
	I	NI	I	NI	I	NI	I	NI	I	NI	I	NI	I	NI	I	NI
1	-0.75 a A	-4.98 c B	9.10 a A	5.20 b B	0.048 b A	0.014 a B	1.24 b A	0.35 a B	7.50 b B	15.79 b A	457 b A	472 b A	237 b A	276 a A	694 c A	749 a A
2	-0.71 a A	-4.10 c B	9.61 a A	5.78 a B	0.045 b A	0.012 a B	1.28 b A	0.40 a B	7.79 b B	14.53 c A	474 a A	448 c B	262 a A	217 b A	742 b A	666 b B
3	-0.80 a A	-4.73 c B	9.47 a A	1.99 d B	0.051 b A	0.002 b B	1.41 b A	0.11 b B	7.04 b B	19.87 a A	442 b A	469 b B	192 b B	246 a A	632 d B	715 a A
4	-0.68 a A	-3.40 b B	8.63 a A	3.26 c B	0.035 c A	0.005 b B	0.93 c A	0.18 b B	9.25 a B	17.35 b A	466 a A	463 b A	257 a A	262 a A	718 b A	726 a A
5	-1.04 a A	-5.13 c B	9.13 a A	4.65 b B	0.043 b A	0.008 b B	1.16 b A	0.31 b B	7.99 b B	13.87 b A	435 b A	444 c A	212 b A	201 b A	646 d A	645 b A
6	-0.81 a A	-4.43 c B	10.18 a A	3.54 c B	0.062 a A	0.006 b B	1.69 a A	0.21 b B	6.05 b B	16.80 b A	478 a A	484 a A	276 a A	314 a A	744 b A	798 a A
7	-0.62 a A	-4.43 c B	8.69 a A	4.19 c B	0.036 c A	0.008 b B	1.00 c A	0.28 b B	9.02 a B	14.50 c A	473 a A	456 c B	281 a A	252 a A	752 b A	708 a A
8	-0.71 a A	-4.55 c B	8.65 a A	5.69 a B	0.045 b A	0.016 a B	1.50 a A	0.49 a B	5.93 b B	11.76 d A	475 a A	452 c B	231 b A	221 b A	709 c A	675 b A
9	-0.60 a A	-2.95 a B	9.07 a A	5.62 a B	0.066 a A	0.014 a B	1.65 a A	0.44 a B	5.52 b B	12.79 c A	473 a A	466 b A	303 a A	280 a A	805 a A	748 a A
10	-0.55 a A	-2.60 a B	8.31 a A	4.00 c B	0.047 b A	0.009 b B	1.31 b A	0.29 b B	6.52 b B	12.32 d A	465 a A	440 c B	281 a A	211 b B	745 b A	656 b B
11	-0.60 a A	-4.98 c B	8.40 a A	3.26 c B	0.034 c A	0.006 b B	1.00 c A	0.20 b B	8.61 a B	15.55 b A	465 a A	439 c B	304 a A	218 b B	768 b A	657 b B
12	-0.75 a A	-3.75 b B	8.50 a A	5.87 a B	0.044 b A	0.016 a B	1.22 b A	0.50 a B	7.04 b B	11.77 d A	448 b A	449 c A	250 a A	265 a A	696 c A	715 a A
13	-0.90 a A	-3.25 b B	9.48 a A	6.66 a B	0.047 b A	0.012 a B	1.31 b A	0.36 a B	7.42 b B	15.89 b A	469 a A	453 c B	271 a A	281 a A	739 b A	733 a A
14	-0.80 a A	-4.13 c B	7.28 b A	4.54 b B	0.029 c A	0.008 b B	0.87 c A	0.19 b B	8.78 a B	21.29 a A	486 a A	447 c B	325 a A	218 b B	814 a A	665 b B
15	-0.61 a A	-2.03 a B	7.13 b A	4.65 b B	0.016 c A	0.009 b B	0.52 d A	0.26 b B	11.67 a B	17.96 b A	448 b A	445 c A	192 b A	216 b A	644 d A	661 b A
16	-0.84 a A	-2.50 a B	6.43 b A	4.87 b B	0.024 d A	0.018 a B	0.70 d A	0.46 a B	9.93 a B	10.69 d A	446 b A	453 c A	197 b A	226 b A	642 d A	679 b A
17	-0.51 a A	-3.65 b B	9.79 a A	4.86 b B	0.052 b A	0.011 b B	1.39 b A	0.33 b B	7.04 b B	14.14 c A	464 a A	461 b A	284 a A	228 b B	747 b A	689 b A
18	-0.76 a A	-4.35 c B	9.18 a A	4.64 b B	0.050 b A	0.017 a B	1.32 b A	0.56 a B	6.97 b A	8.68 d A	455 b A	441 c A	256 a A	205 b B	710 c A	646 b B

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna comparam os genótipos e maiúscula na linha tratamento hídrico dentro de cada genótipo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

Na quarta avaliação, ao analisar a recuperação do potencial hídrico de antemã dos genótipos após o retorno da irrigação, não foi observada interação significativa para o tratamento hídrico, no entanto, houve diferença entre os genótipos avaliados; onde se verificou maiores valores médios nas plantas dos genótipos 1, 2, 6, 7, 11, 12, 13, 16, 17 e 18 (TABELA 11).

As plantas dos genótipos 4, 5 e 14 apresentaram boa recuperação em relação a A, gs, E e EUA, pois nesses materiais não foi observada diferença entre o tratamento hídrico para essas características.

Por outro lado, as plantas dos genótipos 8, 9, 12 e 18 oriundos do tratamento não irrigado mantiveram menores valores médios de taxa fotossintética líquida quando comparados ao controle irrigado. O estresse causado pelo déficit hídrico também afetou a gs das plantas dos genótipos 8, 10, 17 e 18; e a E dos genótipos 8, 9, 10, 11, 17 e 18 que apresentaram menores valores médios em relação ao tratamento irrigado. Quanto à EUA as plantas dos genótipos 1, 4, 5, 6, 8, 9 e 14 não apresentaram diferença para o tratamento hídrico, já as plantas dos genótipos 2, 3, 11, 12 e 16 apresentaram menores valores em relação ao tratamento irrigado. No tratamento não irrigado, observou-se maiores valores médios de DPV associados a maiores Tleaf, nas plantas dos genótipos 5, 8, 11 e 13 (TABELA 11).

Quanto aos índices de clorofilas a, b e total, não foi observada diferença significativa para o tratamento hídrico e para a interação G x TH. Somente houve diferença entre os genótipos avaliados, onde 3, 4, 5, 6, 11, 12, 17 e 18 permaneceram no grupo de genótipos com maiores valores médios dessas características (TABELA 11).

Tabela 11 - Potencial hídrico na antemanhã (MPa), taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (gs), taxa transpiratória (E), eficiência do uso da água (EUA), índices de clorofilas Falker a, b e total (Cla, Clb, CIT) de genótipos de *Coffea arabica* L. aos 17 dias após o retorno da irrigação.

Gen	MPa	A		gs		E		EUA		DPV		Tleaf		Cla	Clb	CIT
		I	NI	I	NI	I	NI	I	NI	I	NI	I	NI			
1	-0.58 a	6.84 c A	7.54 b A	0.049 c B	0.061 b A	1.11 c B	1.30 c A	6.21 d A	5.83 c A	2.09 a A	1.91 b B	25.47 a A	24.50 b B	363 b	164 b	527 b
2	-0.63 a	6.81 c B	7.75 b A	0.050 c B	0.066 a A	0.98 c B	1.44 b A	6.98 c A	5.37 c B	2.02 b A	2.14 a A	25.16 b A	25.58 a A	343 b	136 b	480 b
3	-0.69 b	6.49 d A	6.35 c A	0.029 e B	0.048 c A	0.80 d B	1.04 d A	8.15 b A	6.12 c B	2.15 a A	1.95 b B	25.96 a A	24.96 b B	399 a	207 a	601 a
4	-0.71 b	7.19 c A	6.44 c A	0.052 c A	0.051 c A	1.06 c A	1.10 d A	6.80 c A	5.92 c A	1.99 b A	1.97 b A	24.96 b A	24.91 b B	384 a	199 a	579 a
5	-0.82 b	6.23 d A	6.96 b A	0.052 c A	0.051 c A	1.02 c A	1.14 d A	6.11 d A	6.19 c A	1.88 b B	2.11 a A	24.44 b B	25.48 a A	379 a	213 a	597 a
6	-0.64 a	8.03 b B	9.11 a A	0.064 b B	0.073 a A	1.35 b B	1.66 a A	5.94 d A	5.47 c A	2.05 b A	2.11 a A	25.56 a A	25.95 a A	402 a	243 a	642 a
7	-0.51 a	5.79 d B	7.24 b A	0.032 e B	0.042 d A	0.77 d A	0.80 f A	7.55 c B	9.07 a A	2.20 a A	1.86 b B	25.89 a A	24.29 b B	376 a	189 b	565 a
8	-0.70 b	7.41 c A	4.49 e B	0.061 b A	0.034 e B	1.37 b A	0.82 f B	5.41 e A	5.62 c A	1.99 b B	2.20 a A	25.01 b B	25.86 a A	367 b	176 b	535 b
9	-0.83 b	9.14 a A	7.56 b B	0.064 b A	0.057 b A	1.38 b A	1.21 d B	6.62 d A	6.24 c A	2.08 a A	2.13 a A	25.33 b A	25.62 a A	373 a	181 b	553 b
10	-0.71 b	7.34 c A	7.10 b A	0.065 b A	0.049 c B	1.42 b A	1.08 d B	5.25 e B	6.62 c A	2.15 a B	2.23 a A	25.84 a A	25.89 a A	357 b	167 b	524 b
11	-0.48 a	7.46 c A	6.87 b A	0.047 c A	0.049 c A	1.03 c A	1.12 d B	7.35 c A	6.25 c B	1.99 b B	2.29 a A	24.92 b B	26.33 a A	386 a	218 a	605 a
12	-0.60 a	6.28 d A	5.33 d B	0.035 d A	0.041 d A	0.79 d B	0.93 e A	7.92 b A	5.83 c B	2.11 a A	2.01 b A	25.56 a A	25.03 b A	385 a	207 a	592 a
13	-0.64 a	5.19 e A	5.57 d A	0.037 d A	0.032 e A	0.86 d A	0.77 f A	6.03 d B	7.16 b A	2.02 b B	2.24 a A	24.85 b B	26.09 a A	365 b	178 b	544 b
14	-0.74 b	7.03 c A	6.92 b A	0.045 c A	0.044 c A	1.00 c A	1.01 d A	7.05 c A	6.83 c A	2.15 a A	2.26 a A	25.77 a A	26.17 a A	366 b	181 b	553 b
15	-0.82 b	6.86 c A	7.72 b A	0.045 c A	0.040 d A	1.06 c A	0.94 e A	6.47 d B	8.30 a A	2.19 a A	2.06 b A	25.97 a A	25.14 b B	371 a	185 b	556 b
16	-0.47 a	4.94 e B	6.19 c A	0.028 e B	0.047 c A	0.53 e B	1.12 d B	9.26 a A	5.52 c B	2.20 a A	2.22 a A	25.81 a A	26.07 a A	332 b	141 b	473 b
17	-0.55 a	7.25 c A	6.72 b A	0.070 a A	0.057 b B	1.50 b A	1.14 d B	4.82 e B	5.89 c A	2.15 a A	2.19 a A	25.43 a A	26.10 a A	385 a	210 a	595 a
18	-0.59 a	8.32 b A	6.39 c B	0.075 a A	0.036 e B	1.71 a A	0.83 f B	4.89 e B	7.73 b A	2.15 a A	2.14 a A	26.08 a A	25.84 a A	383 a	201 a	580 a

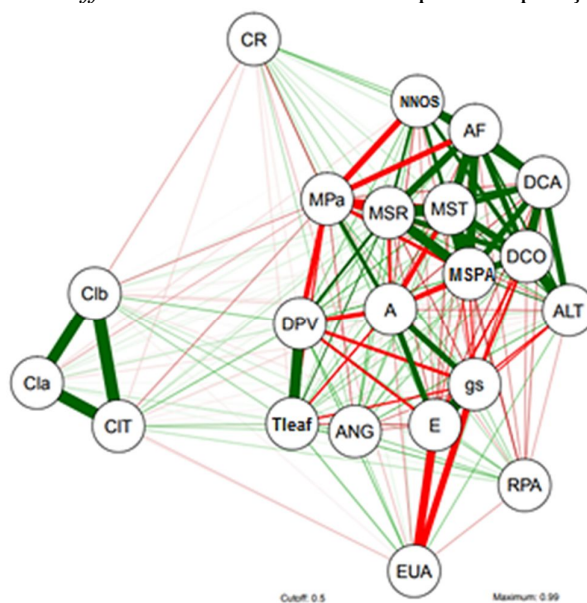
Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna comparam os genótipos e maiúscula na linha tratamento hídrico dentro de cada genótipo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

3.4 Correlação entre características morfofisiológicas de genótipos de *Coffea arabica* L. sob condição de déficit hídrico

Nas plantas que receberam o tratamento hídrico não irrigado, aos 25 dias após a imposição do déficit, foi possível observar correlação fenotípica negativa entre potencial hídrico de antemanhã (MPa) e as características morfológicas de área foliar (AF), número de nós (NNOS), massa seca da raiz (MSR), além de déficit de pressão de vapor (DPV). Essa última também apresentou correlação fenotípica positiva com a temperatura foliar (Tleaf) e negativa com a taxa fotossintética líquida (A). As características fisiológicas A, gs e E apresentaram correlação positiva e a eficiência do uso da água (EUA) apresentou correlação fenotípica negativa com E e gs. Houve correlação fenotípica positiva entre os índices de clorofila (Cla, Clb e CIT) (FIGURA 2).

Figura 2 - Rede de correlações fenotípicas entre características morfológicas e fisiológicas de genótipos de *Coffea arabica* L aos 25 dias após a imposição do déficit hídrico.



As linhas em destaque representam correlação maior que 0.5 (Cutoff), sendo que as linhas vermelhas representam correlações negativas e as verdes correlações positivas. A espessura da linha é proporcional à magnitude da correlação. Variáveis morfológicas: área foliar (AF), altura de planta (ALT), diâmetro de caule (DCA), diâmetro de copa (DCO), número de nós (NNOS), ângulo de inserção do ramo plagiotrópico (ANG), peso da matéria seca da parte aérea (MSPA), peso da matéria da raiz (MSR), peso da matéria seca total (MST), comprimento da raiz (CR), relação entre raiz e parte aérea (RPA). Variáveis fisiológicas: potencial hídrico na antemanhã (MPa), taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (gs), taxa transpiratória (E), eficiência instantânea do uso da água (EUA), déficit de pressão de vapor (DPV), temperatura foliar (Tleaf), índice de clorofila a (Cla), índice de clorofila b (Clb) e índice de clorofila total (CIT).

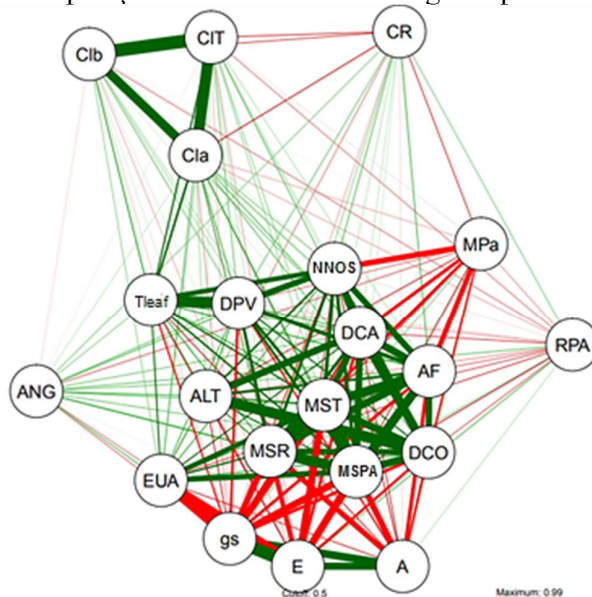
Fonte: Da autora (2021).

Aos 33 dias após a imposição do deficit hídrico, observou-se correlação fenotípica negativa entre potencial hídrico de antemanhã (MPa), número de nós (NNOS), diâmetro de caule (DCA) e área foliar (AF) (FIGURA 3).

Assim como na avaliação dos 25 dias após a imposição do deficit hídrico, observou-se correlação fenotípica positiva entre as características morfológicas, bem como correlação fenotípica positiva entre os índices de clorofilas. A taxa fotossintética líquida (A) apresentou correlação fenotípica negativa com o diâmetro de copa (DCO), peso da matéria seca da parte aérea (MSPA), bem como correlação fenotípica positiva com a condutância estomática (gs) e taxa transpiratória (E) (FIGURA 3).

Houve correlação fenotípica positiva entre o deficit de pressão de vapor (DPV) com temperatura foliar (Tleaf) e número de nós (NNOS). Já na eficiência do uso da água observou-se correlação fenotípica positiva com massa seca total (MST), peso da matéria seca da parte aérea (MSPA), além de correlação negativa com gs e E (FIGURA 3).

Figura 3 - Rede de correlações fenotípicas entre características morfológicas e fisiológicas aos 33 dias após a imposição do deficit hídrico em genótipos de *Coffea arabica* L.



As linhas em destaque representam correlação maior que 0.5 (Cutoff), sendo que as linhas vermelhas representam correlações negativas e as verdes correlações positivas. A espessura da linha é proporcional à magnitude da correlação. Variáveis morfológicas: área foliar (AF), altura de planta (ALT), diâmetro de caule (DCA), diâmetro de copa (DCO), número de nós (NNOS), ângulo de inserção do ramo plagiotrópico (ANG), peso da matéria seca da parte aérea (MSPA), peso da matéria seca da raiz (MSR), peso da matéria seca total (MST), comprimento da raiz (CR), relação entre raiz e parte aérea (RPA). Variáveis fisiológicas: potencial hídrico na antemanhã (MPa), taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (gs), taxa transpiratória (E), eficiência instantânea do uso da água (EUA), deficit de pressão de vapor (DPV), temperatura foliar (Tleaf), índice de clorofila a (Cla), índice de clorofila b (Clb) e índice de clorofila total (CIT).

Fonte: Da autora (2021).

4 DISCUSSÃO

No presente estudo, uma seleção de plantas de genótipos de *Coffea arabica* L. submetidos ao déficit hídrico foram avaliadas quanto a resposta morfofisiológica. Os resultados evidenciaram variabilidade dentre as plantas dos genótipos nos períodos avaliados e diferentes estratégias de adaptação frente ao estresse imposto. A identificação dessas características pode auxiliar no entendimento de mecanismos de adaptação ao déficit hídrico e na seleção de plantas de genótipos tolerantes em programas de melhoramento (LANNA *et al.*, 2021).

Características morfológicas tais como porte e área foliar têm sido relacionadas a um melhor desempenho fotossintético e, conseqüentemente, maior produtividade (BANGAR *et al.*, 2019; CARVALHO *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2016). Na primeira avaliação, quando as plantas estavam com disponibilidade hídrica, observou-se variabilidade quanto aos traços morfológicos das plantas dos genótipos avaliados. As plantas dos genótipos 7, 11 e 14, pertencentes ao grupo de maior área foliar, apresentaram maior taxa fotossintética líquida (A) associados a menor taxa transpiratória (E), mesmo com maiores valores médios de déficit de pressão de vapor (DPV) e temperatura foliar (Tleaf) (TABELAS 2 e 6). As plantas dos genótipos 11 e 4 também se destacaram com maiores valores médios das características vegetativas, o que pode indicar crescimento mais rápido das plantas desses genótipos e aptidão ao cultivo em sistema irrigado. Por outro lado, essas características podem deixar a planta mais exposta à transpiração excessiva em períodos secos (XIU-BING *et al.*, 2020).

A redução do crescimento é uma das primeiras linhas de defesa ao estresse hídrico e ocorre devido à baixa disponibilidade de água no solo que afeta a divisão e alongamento celular. Este é um mecanismo para evitar a desidratação, pois ao reduzir a área exposta, a planta evita a transpiração excessiva e, conseqüentemente, diminui a demanda por água (BACCARI *et al.*, 2020; BANGAR *et al.*, 2019; LANNA *et al.*, 2021). A maior ou menor intensidade na redução do crescimento varia de acordo com o material genético (ARAUJO *et al.*, 2011; RODRIGUES *et al.*, 2015). No presente trabalho, as plantas que apresentaram redução para grande parte das características de crescimento avaliadas foram dos genótipos 4, 5, 8 e 9 (TABELA 3).

O sistema radicular mais profundo é um importante atributo morfológico e está relacionado às plantas dos genótipos tolerantes à seca (CANALES *et al.*, 2021; KAPOOR *et al.*, 2020; LANNA *et al.*, 2021). Neste trabalho, dentre as plantas dos genótipos que sob condições de déficit hídrico, permaneceram no grupo de maior RPA, destacou-se as do genótipo 2. As plantas desse genótipo quando submetido ao déficit hídrico apresentaram redução na MSPA e maior RPA em relação ao controle irrigado, o que demonstra investimento no sistema

radicular em situação de deficit hídrico (TABELA 5). A redistribuição de fotoassimilados para o desenvolvimento radicular consiste num importante mecanismo de adaptação ao estresse hídrico, permitindo maior exploração do solo, manutenção da hidratação e de trocas gasosas (GHATAK; CHATURVEDI; WECKWERTH, 2017; KAPOOR *et al.*, 2020).

Aos 25 dias após a imposição do deficit hídrico (DAIDH), as plantas não irrigadas atingiram estresse hídrico moderado com potencial hídrico entre -1,55 a -2,90 MPa (TABELA 8). Vale ressaltar, que a temperatura máxima nesse período era acima de 40 °C e foi registrada umidade relativa mínima de 21% (FIGURA 1). Diante dessas condições houve redução de 62% na gs e de 58,9% na E, em relação ao controle irrigado (TABELA 8). Esse resultado corrobora com outros estudos que verificaram a redução na condutância e transpiração em plantas submetidas ao deficit hídrico (LANNA *et al.*, 2021; NATARAJAN *et al.*, 2020; TORRE *et al.*, 2021). As plantas dos genótipos 3, 4, 6, 7, 11 e 15 foram mais afetadas pelo deficit hídrico, uma vez que houve redução no MPa concomitante com a redução nas trocas gasosas, que apresentaram menores valores médios em relação aos demais genótipos (TABELA 8).

Entretanto, plantas de outros genótipos avaliados demonstraram estratégias de adaptação distintas após 25 dias do estresse imposto. As plantas dos genótipos 13 e 16 não tiveram o potencial hídrico na antemanhã significativamente afetados pelo deficit hídrico e permaneceram no grupo de maior taxa fotossintética, associados a menores valores médios de condutância estomática e transpiração quando não irrigados. Já as plantas dos genótipos 1, 2, 8, 12 e 16 observou-se maior potencial hídrico na antemanhã associado à manutenção da taxa fotossintética líquida, em relação aos demais genótipos avaliados. Por outro lado, nas plantas do genótipo 5 foi observado valor inferior de potencial hídrico (-2,38 MPa), associado ao valor da taxa fotossintética semelhante ao controle irrigado (TABELA 8). A manutenção da fotossíntese, transpiração e potencial hídrico podem ser características relacionadas a materiais tolerantes à seca (BACCARI *et al.*, 2020; TURNER, 1986).

Houve incremento na eficiência instantânea do uso da água na maioria das plantas do tratamento hídrico não irrigadas em relação ao tratamento irrigado, aos 25 DAIDH (TABELA 8). Provavelmente, este aumento nessa característica em relação ao manejo hídrico, ocorreu devido à redução na taxa transpiratória, contudo, essa restrição limita a absorção de CO₂ e influencia negativamente a fotossíntese (BLANKENAGEL *et al.*, 2018), conforme observado nas plantas dos genótipos 3, 6, 7, 14 e 15. Para Natarajan *et al.* (2020), o aumento da EUA deve ser acompanhado da manutenção da fotossíntese. Por outro lado, esse comportamento pode estar relacionado com a capacidade de percepção da planta às variações hídricas ambientais, comportamento observado em plantas C3 sob deficit hídrico moderado (BLANKENAGEL *et*

al., 2018). Em contraste, as plantas dos genótipos 2, 5 e 8 mantiveram a taxa fotossintética associada ao aumento da EUA, sob déficit hídrico.

Para os índices de clorofila a, b e total, observou-se que o tratamento hídrico influenciou as plantas dos genótipos 1, 3 e 5, que apresentaram menores valores médios em relação ao tratamento irrigado (TABELA 8). A clorofila é o principal pigmento relacionado à fotossíntese, sendo essencial para a absorção da energia luminosa. Menores teores desse pigmento podem afetar os níveis e estabilidade de algumas proteínas presentes no complexo antena (STREIT *et al.*, 2005; VOITSEKHOVSKAJA; TYUTEREVA, 2015). A redução nos índices de clorofilas é comumente observada em plantas submetidas ao estresse hídrico, e pode estar relacionada com a limitação na absorção de nutrientes, bem como ao estresse oxidativo (ADIBA *et al.*, 2021; BACCARI *et al.*, 2020; HAMBLIN; STEFANOVA; ANGESSA, 2014; HASSAN *et al.*, 2021).

Aos 33 DAIDH, a maioria dos genótipos mantidos sem irrigação, chegou ao potencial hídrico de antemanhã inferiores a -3MPa (TABELA 10). Embora o DPV e Tleaf não tenham apresentado significância na interação G x TH, foram observados maiores valores dessas características nas plantas submetidas ao déficit hídrico (TABELA 9). Ao mesmo tempo, a temperatura máxima na casa de vegetação atingiu 39 °C e a umidade relativa mínima foi de 35%, situações como ocorrem naturalmente em campo durante períodos secos (FIGURA 1), o que pode ter ocasionado a redução do potencial hídrico de antemanhã e nas trocas gasosas nas plantas dos genótipos avaliados.

A manutenção do potencial hídrico é uma forma de prevenir a desidratação (TURNER, 1986). Comportamento observado nas plantas dos genótipos 9, 10, 15 e 16, que aos 33 DAIDH permaneceram com maiores valores médios dessa característica, seguido pelas plantas dos genótipos 4, 12, 13 e 17 com valores intermediários (TABELA 10). Dentre as plantas desses genótipos destacaram-se a 9, 12 e 13 que mantiveram maiores valores médios de A, gs e E, em relação aos demais (TABELA 10). Em contraste, as plantas do genótipo 10, embora tenha permanecido dentre os genótipos com maior potencial hídrico de antemanhã (-2,60 MPa) no tratamento não irrigado, apresentou menores valores médios de A, gs, E, Cla, Clb e CIT (TABELA 10). Essa redução pode estar relacionada à maior sensibilidade desse genótipo sob estresse hídrico moderado, em relação aos demais.

As plantas dos genótipos 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 11, 14 e 18 atingiram uma faixa de déficit hídrico severo aos 33 DAIDH com potencial hídrico de antemanhã entre -5,15 e -4,10 MPa. No que se refere a taxa fotossintética líquida observou-se uma redução entre 34 e 79% para essa característica nesse grupo em relação ao controle irrigado. As plantas dos genótipos 8, 14 e 2

essa redução representou 34, 38 e 39%, respectivamente. Possivelmente, devido a maiores valores médios na g_s e E observados nesses genótipos, com exceção das plantas do 14, que possibilitou a fixação de CO_2 , necessário para a A (TABELA 10). A manutenção da fotossíntese pode estar relacionada à capacidade da planta suportar períodos de estresse hídrico (BACCARI *et al.*, 2020).

Em contraste, as plantas dos genótipos 3 e 6 foram os que apresentaram maior redução da A . As plantas do genótipo 3 foram mais afetadas pelo deficit hídrico com redução na g_s , E e A , representando 96%, 92% e 79% em relação ao controle irrigado, respectivamente. Já as plantas do genótipo 6 apresentaram redução de 90% na g_s e 87% na E , resultando em queda de 65% na A (TABELA 10). Quando a planta passa por estresse hídrico, a primeira resposta é o fechamento estomático, como uma maneira de evitar a transpiração excessiva (TORRE *et al.* 2021), comportamento observado em todos os genótipos avaliados. No entanto, a drástica redução na condutância estomática e na taxa fotossintética das plantas desses genótipos, pode indicar suscetibilidade desses materiais ao estresse hídrico (CANALES *et al.*, 2021), uma vez que a redução na transpiração não contribuiu para a manutenção do *status* hídrico, sendo que esse resultado corrobora com Canales *et al.* (2021), que observaram comportamento semelhante em genótipo suscetível. Além disso, o incremento no índice de clorofila b observado no genótipo 3, pode ser devido ao aumento da temperatura foliar, em função do fechamento estomático. Isso provoca queda no influxo de CO_2 , necessário para a realização da fotossíntese (TORRE *et al.*, 2021), como tentativa de manter o desempenho fotossintético pode ocorrer aumento de carotenoides e de clorofilas (SILVA *et al.*, 2013). Resultados similares foram verificados em plantas sob baixa disponibilidade hídrica por Torre *et al.* (2021).

Por outro lado, o genótipo 5, que possui a mesma genealogia do genótipo 3, porém constituído de outra seleção de plantas (TABELA 1), apresentou comportamento diferente frente ao estresse hídrico, onde foi observado menor crescimento quanto ao número de nós, altura, MSPA, MSR e MST, em relação ao controle irrigado (TABELAS 3 e 5). O que pode ter favorecido esse genótipo que, mesmo em condições de baixo potencial hídrico de antemanhã (-5,15 MPa), manteve a taxa fotossintética no segundo grupo de maiores valores médios dessa característica aos 33 dias sem irrigação (TABELA 10). Este pode ser um mecanismo de adaptação das plantas desse genótipo frente ao estresse hídrico (BACCARI *et al.*, 2020).

A eficiência instantânea do uso da água aos 33 DAIDH permaneceu com maiores valores médios para o tratamento não irrigado, em relação ao irrigado, tal qual aos 25 DAIDH (TABELAS 9 e 10). Destacaram-se as plantas dos genótipos 2, 8, 9, 12 e 13, que mantiveram maiores valores médios de fotossíntese dentre as plantas não irrigados associados a maior EUA

em relação ao controle irrigado (TABELA 10). Esse comportamento pode indicar maior eficiência das plantas desses genótipos na assimilação de carbono, durante o processo fotossintético, bem como controle na transpiração (FERREIRA; GONÇALVES; FERRAZ, 2012).

Ao analisar a recuperação das plantas após o déficit hídrico, não se observou diferença estatística entre G x TH para o potencial hídrico de antemanhã e índices de clorofilas nos genótipos avaliados (TABELA 11), o que indica possibilidade de recuperação da hidratação e da absorção de luminosidade das plantas. No entanto, observou-se efeito significativo na interação G x TH para as características A, gs, E, EUA, DPV e Tleaf (TABELA 11).

A taxa fotossintética foi recuperada em 10 genótipos dentre os 18 avaliados, os quais apresentaram condutância estomática e transpiração semelhantes ou superiores ao controle irrigado, com exceção das plantas dos genótipos 10 e 17, que embora tenham apresentado taxa fotossintética semelhante ao controle irrigado, permaneceram com valores inferiores de gs e E, em relação ao controle irrigado (TABELA 11). Resultados semelhantes foram observados por Nóia Júnior *et al.* (2020), que verificaram recuperação mais rápida da A em relação a gs e E, em plantas submetidas ao déficit hídrico. Para Galmés, Medrano e Flexas (2007) esse comportamento pode ter relação com a otimização do uso de carbono interno em plantas que passaram por período de estresse hídrico.

O fechamento estomático diminui a transpiração excessiva e pode tornar as plantas mais eficientes no uso da água (FERREIRA; GONÇALVES; FERRAZ, 2012). Após o retorno da irrigação, foi observada no tratamento não irrigado, maior EUA nas plantas dos genótipos 7, 10, 13, 15, 17 e 18, em relação ao controle irrigado (TABELA 11). Esse resultado corrobora com Nóia Júnior *et al.* (2020), que observaram incremento dessa característica em plantas que passaram por um período de estresse hídrico, mesmo após a reidratação. Esta pode ser uma capacidade adaptativa desses genótipos ao uso da água ou estar relacionado a um fator de memória da planta ao estresse sofrido (MENEZES-SILVA *et al.*, 2017; NÓIA JÚNIOR *et al.*, 2020).

Após serem reidratados, as plantas dos genótipos 4, 5 e 14 apresentaram A, gs, E e EUA, semelhantes ao controle irrigado (TABELA 11), o que pode indicar maior capacidade de recuperação desses materiais. Por outro lado, as plantas dos genótipos 8, 9, 12 e 18 não recuperaram a taxa fotossintética em relação ao controle irrigado. Esse resultado pode estar relacionado a danos causados por reações bioquímicas que podem ocorrer simultaneamente com as limitações estomáticas (GALMÉS; MEDRANO; FLEXAS, 2007).

Na análise de rede de correlações verificou-se características correlacionadas e estas demonstraram padrões semelhantes nas duas avaliações (25 e 33 DAIDH) nas plantas submetidas ao deficit hídrico (FIGURAS 2 e 3). Esse tipo de análise auxilia na seleção de genótipos e permite a identificação de grupos de caracteres correlacionados (SILVA *et al.*, 2016).

Aos 25 DAIDH, verificou-se correlação fenotípica negativa entre o deficit de pressão de vapor, potencial hídrico de antemanhã e fotossíntese (FIGURA 2). Quando a planta passa por uma condição climática em que há baixa umidade relativa do ar, assim como observado no presente trabalho (FIGURA 1), há um aumento da demanda evaporativa da atmosfera (maior deficit de pressão de vapor - DPV), conseqüentemente, os estômatos se fecham para evitar a transpiração excessiva e há uma queda na taxa fotossintética (LEMOS *et al.*, 2012).

Houve correlações fenotípicas positivas entre a maioria das características morfológicas (AF, NNOS, ALT, MSPA, MSR, MST, DCA, DCO) (FIGURAS 2 e 3). Esse resultado corrobora com Bangar *et al.* (2019), que verificaram alta correlação dentre as variáveis morfológicas. No entanto, de maneira geral, as características morfológicas apresentaram correlação negativa com o potencial hídrico na antemanhã (MPa), taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (gs) e transpiração (E). Resultados semelhantes foram observados por Coelho (2017), e isso sugere que plantas com maiores valores dessas características morfológicas tendem a ser mais sensíveis ao deficit hídrico e, portanto, não devem ser recomendadas para regiões propensas à seca.

Este estudo descreve aspectos importantes do efeito do deficit hídrico em genótipos de cafeeiro. As principais estratégias da adaptação ao estresse hídrico observadas foram manutenção de trocas gasosas (genótipos 8 e 2); redução no crescimento vegetativo (genótipos 4, 5, 8 e 9); investimento no sistema radicular (genótipo 2); manutenção da fotossíntese associada a baixo potencial hídrico de antemanhã (genótipo 5); alto potencial hídrico de antemanhã na fase de estresse moderado e intermediário na fase de estresse severo associado à manutenção da fotossíntese (genótipo 13) e; manutenção alto de potencial hídrico de antemanhã nas fases de estresse moderado e severo (genótipo 16). Além disso, dentre os genótipos destacados, os genótipos 2, 5 e 13 são do grupo de Híbrido de Timor, material conhecido pela resistência à ferrugem, principal doença do cafeeiro. Assim, os resultados encontrados podem auxiliar na seleção de materiais potencialmente tolerantes à seca e resistentes à ferrugem do cafeeiro, bem como no desenvolvimento de cultivares de café, com essas características.

5 CONCLUSÃO

Os genótipos de *Coffea arabica* L. apresentaram variabilidade quanto as características fisiológicas e morfológicas indicando diferentes estratégias de tolerância frente ao deficit hídrico.

Destacaram-se os genótipos Híbridos de Timor UFV 376-12, UFV 377-21 e UFV 376-31 e o derivado do cruzamento de BE Wush-Wush com Híbrido de Timor UFV 366-08, com potencial para a tolerância à seca, por apresentarem adaptações sob deficit hídrico que contribuíram para a manutenção do *status* hídrico em fase de desenvolvimento inicial. Sendo que as principais estratégias de adaptação foram a manutenção de trocas gasosas e potencial hídrico na antemanhã, redução no crescimento vegetativo e investimento no sistema radicular.

REFERÊNCIAS

- ADIBA, A. *et al.* Assessment of water stress tolerance in eleven pomegranate cultivars based on agronomic traits. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 243, n. 106419, p. 1-7, 2021.
- ALVARES, C.A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s.l.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ARAÚJO, G.L. *et al.* Influência do déficit hídrico no desenvolvimento inicial de duas cultivares de café conilon. **Irriga**, [s.l.], v. 16, n. 2, p. 115-124, 2011.
- BACCARI, S. *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**, [s.l.], v. 11, n. 614144, p. 1-14, 2020.
- BANGAR, P. *et al.* Morphophysiological and biochemical response of mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] varieties at different developmental stages under drought stress. **Turkish Journal Biology**, [s.l.], v. 43, n. 1, p. 58-69, 2019.
- BARBIERI JÚNIOR, E. *et al.* Um novo clorofilômetro para estimar os teores de clorofila em folhas do capim Tifton 85. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 12, p. 2242-2245, 2012.
- BARBOSA, I. *et al.* Sensory quality of *Coffea arabica* L. genotypes influenced by postharvest processing. **Crop breeding and applied biotechnology**, Viçosa, MG, v. 19, n. 4, p. 428-435, 2019.
- BARROS, R.S. *et al.* Determinação da área foliar em café (*Coffea arabica* L. cv. 'Bourbon Amarelo'). **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 20, n. 107, p. 44-52, 1973.
- BLANKENAGEL, S. *et al.* Generating plants with improved water use efficiency. **Agronomy**, [s.l.], v. 8, n. 194, p. 1-13, 2018.
- BRUM, C.N. *et al.* Modifications in the metabolism of carbohydrates in (*Coffea arabica* L. cv. Siriema) seedlings under drought conditions. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 2, p. 140-147, 2013.
- CANALES, F.J. *et al.* Drought resistance in oat involves ABA-mediated modulation of transpiration and root hydraulic conductivity. **Environmental and Experimental Botany**, [s.l.], v. 182, n. 104333, p. 1-14, 2021.
- CARVALHO, A. *et al.* Aspectos genéticos do cafeeiro. **Revista Brasileira de Genética**, [s.l.], v. 14, n. 1, p. 135-183, 1991.
- CARVALHO, A.M. de. Correlação entre crescimento e produtividade de cultivares de café em diferentes regiões de Minas Gerais, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 3, p. 269-275, 2010.

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

COELHO, L.S. **Seleção de cafeeiros do cruzamento de Icatu x Catimor sob déficit hídrico**. 2017. 71 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

COLTRI, P.P. *et al.* Low levels of shade and climate change adaptation of Arabica coffee in southeastern Brazil. **Heliyon**, [s.l.], v. 5, n. 2, p. 1-27, 2019.

CRUZ, C.D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum**, [s.l.], v. 35, n. 3, p. 271-276, 2013.

DAMATTA, F.M.; RAMALHO, J.D.C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal Plant Physiology**, Campos dos Goytacases, v. 18, n. 1, p. 55-81, 2006.

DAVIS, A.P. *et al.* The impact of climate change on indigenous arabica coffee (*Coffea arabica*): predicting future trends and identifying priorities. **Plos One**, [s.l.], v. 7, n. 11, p.1-13, 2012.

DUBBERSTEIN, D. *et al.* Resilient and sensitive key points of the photosynthetic machinery of *Coffea* spp. to the single and superimposed exposure to severe drought and heat stresses. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 11, n. 1049, p. 1-22, 2020.

DUBBERSTEIN, D. *et al.* Mitigation of the negative impact of warming on the Coffee crop: The Role of Increased Air [CO₂] and Management Strategies. *In: Climate Resilient Agriculture-Strategies and Perspectives*. Intech: Rijeka, 2018.

FARES, A. *et al.* Irrigation water requirements for seed corn and coffee under potential climate change scenarios. **Journal of Water and Climate Change**, [s.l.], v. 7, n. 1, p. 39-51, 2016.

FERREIRA, M.J.; GONÇALVES, J.F. de C.; FERRAZ, J.B.S. Crescimento e eficiência do uso da água de plantas jovens de castanheira da Amazônia em área degradada e submetidas à adubação. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 2, p. 393-401, 2012.

FREIRE, L.P. *et al.* Análise da expressão do gene manose 6 fosfatos redutase em cafeeiros submetidos ao déficit hídrico. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 17-23, 2013.

GALMÉS, J.; MEDRANO, H.; FLEXAS J. Photosynthetic limitations in response to water stress and recovery in Mediterranean plants with different growth forms. **New Phytologist**, [s.l.], v. 175, n.1, p. 81-93, 2007.

GHATAK, A.; CHATURVEDI, P.; WECKWERTH, W. Cereal crop proteomics: Systemic analysis of crop drought stress responses towards marker-assisted selection breeding. **Frontier in Plant Science**, [s.l.], v. 8, n. 757, p. 1-25, 2017.

- GUEDES, J.M. Divergência genética entre cafeeiros do germoplasma Maragogipe. **Bragantia**, Campinas, v. 72, n. 2, p. 127-132, 2013.
- GUIMARÃES, P.T.G. *et al.* Cafeeiro. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ VENEGAS, V.H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999, 360 p.
- HAMBLIN, J.; STEFANOVA, K.; ANGESEA, T. T. Variation in chlorophyll content per unit leaf area in spring wheat and implications for selection in segregating material. **Plos One**, [s.l.], v. 9, n. e92529, p. 1-9, 2014.
- HASSAN, M.A. E. *et al.* Variability in drought response among the plus tree accessions of *Tectona grandis* (Linn f.) from the provenances of Kerala, South India. **Acta Physiologiae Plantarum**, [s.l.], v. 43, n.47, p. 1-12, 2021.
- KAPOOR, D. *et al.* The impact of drought in plant metabolism: how to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. **Applied Sciences**, [s.l.], v. 10, n. 5692, p. 1-19, 2020.
- LANNA, A.C. *et al.* Upland rice: phenotypic diversity for drought tolerance. **Scientia Agricola**, [s.l.], v. 78, n. 5, p. 1-14, 2021.
- LEMOS, J.P. *et al.* Morfologia de plantas de milho em competição com picão-preto e travaeraba submetidas a roçada. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 30, n. 3, p. 487-496, 2012.
- LIU, S. *et al.* Biomechanics in plant resistance to drought. **Acta Mechanica Sinica**, [s.l.], v. 36, n. 5, p.1142-1157, 2020.
- MENEZES-SILVA, P.E. *et al.* Photosynthetic and metabolic acclimation to repeated drought events play key roles in drought tolerance in coffee. **Journal of Experimental Botany**, [s.l.], v. 68, n. 15, p.1-14, 2017.
- MOAT, J. *et al.* Resilience potencial of the Ethiopian coffee sector under climate change. **Nature Plants**, [s.l.], v. 3, n. 17081, p. 1-14, 2017.
- NATARAJAN, S. *et al.* Genotypic variation in intrinsic transpiration efficiency correlates with sugarcane yield under rainfed and irrigated field conditions. **Physiologia Plantarum**, [s.l.], v. 172, n. 2, p. 1-14, 2020.
- NÓIA JÚNIOR, R.D. *et al.* Ecophysiological acclimatization to cyclic water stress in Eucalyptus. **Journal of Forestry Research**, [s.l.], v. 31, n. 3, p. 797–806, 2020.
- PELOSO, A.F. *et al.* Limitações fotossintéticas em folhas de cafeeiro arábica promovidas pelo déficit hídrico. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 3, p.389-399, 2017.
- RODRIGUES, R.R. *et al.* Disponibilidade hídrica no solo no desenvolvimento inicial do cafeeiro conilon. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 1, p. 46-55, 2015.
- RUIZ-CÁRDENAS, R. **A cafeicultura e sua relação com o clima**. Lavras: HRNS do Brasil, 2015. 23 p.

SANTOS, H.G. dos *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SILVA, A.R.; CECON, P.R.; PUIATTI, M. Phenotypic correlation network analysis of garlic variables. **Multi-Science Journal**, [s.l.], v. 3, n. 6, p. 9–12, 2015.

SILVA, E.N. *et al.* Contrasting physiological responses of *Jatropha curcas* plants single and combined stresses of salinity and heat. **Journal Plant Growth Regul**, [s.l.], v. 32, n. 1, p. 159-169, 2013.

SILVA, A.R. da *et al.* Correlation network analysis between phenotypic and genotypic traits of chili pepper. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 51, n. 4, p. 372-377, 2016.

STREIT, N.M. *et al.* As clorofilas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 748-755, 2005.

TORRE, F.D. *et al.* Leaf morphophysiological changes induced by long-term drought in *Jatropha curcas* plants explain the resilience to extreme drought. **Journal of Arid Environments**, [s.l.], v. 185, n. 104381, p. 1-8, 2021.

THIOUNE E-H. *et al.* Temperature impacts the response of *Coffea canephora* to decreasing soil water availability. **Tropical Plant Biology**, v. 13, p. 236-250, 2020.

TURNER, N.C. Crop water deficits: a decade of progress. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 39, p. 1-51, 1986.

VOITSEKHOVSKAJA, O.V.; TYUTEREVA, E.V. Chlorophyll b in angiosperms: functions in photosynthesis, signaling and ontogenetic regulation. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 189, p. 51-64, 2015.

XIU-BING, G. *et al.* High soybean yield and drought adaptation being associated with canopy architecture, water uptake, and root traits. **Agronomy**, [s.l.], v. 10, n. 208, p.1-11, 2020.

ARTIGO 2 RESPOSTAS FISIOLÓGICAS, BIOQUÍMICAS E ANATÔMICAS FOLIARES DE GENÓTIPOS DE *Coffea arabica* L. SUBMETIDOS AO DEFICIT HÍDRICO

RESUMO

Objetivou-se avaliar as respostas de genótipos de *Coffea arabica* L. à deficiência hídrica, por meio de características fisiológicas, bioquímicas e anatômicas foliares. O experimento foi instalado na casa de vegetação da Estação Experimental da EPAMIG, em Lavras-MG. Foram utilizados 7 acessos de *Coffea arabica* L. do Banco Ativo de Germoplasma da EPAMIG em Patrocínio-MG, além de duas cultivares, uma considerada tolerante (IPR 100) e outra sensível (Rubi MG1192) à deficiência hídrica. Os genótipos foram submetidos a dois tratamentos hídricos, o primeiro mantendo a umidade de solo na capacidade de campo e o segundo com suspensão total da irrigação. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 9 x 2 (genótipos x tratamento hídrico). Para cada tratamento foram consideradas quatro repetições e cada parcela experimental foi constituída por uma planta. Quanto às características fisiológicas avaliou-se as trocas gasosas e potencial hídrico de antemanhã. Em relação a bioquímica foram avaliados os níveis de peróxido de hidrogênio (H₂O₂), malondialdeído (MDA), a atividade das enzimas catase (CAT), superóxido dismutase (SOD), ascorbato peroxidase (APX) e ascorbato (AsA). As características anatômicas foliares avaliadas foram: espessura da cutícula da face adaxial (CUT), espessura do limbo foliar (LIM), densidade estomática (DEN), relação entre diâmetro polar e equatorial (DPDE), área do floema (AF); área (AX), diâmetro (DX), frequência de vasos (FVX), condutividade hidráulica relativa (CHR) e índice de vulnerabilidade (IV) do xilema. As avaliações fisiológicas e bioquímica ocorreram em três períodos distintos: no início do tratamento hídrico, onde as plantas estavam em condição de capacidade de campo; aos 25 dias após a imposição do deficit hídrico (DAIDH); e na recuperação dos genótipos aos 17 dias após a reidratação. Já as avaliações anatômicas foliares foram realizadas ao final do período experimental. Os resultados obtidos demonstraram diferentes respostas dos genótipos em relação as características fisiológicas, bioquímicas e anatômicas foliares avaliadas em função do estresse hídrico. Observou-se distinção dos genótipos irrigados e não irrigados aos 25 DAIDH, houve redução nas trocas gasosas e no potencial hídrico de antemanhã. Após a reidratação, observou-se recuperação nas trocas gasosas na maioria dos genótipos avaliados. Durante a fase de estresse hídrico (25 DAIDH) observou-se a indução do sistema antioxidante em alguns genótipos, destacando-se a cultivar IPR100. Quanto à anatomia foliar, verificou-se no tratamento não irrigado, que o incremento na espessura da CUT, na relação DPDE, além de menor IV e a manutenção da CHR favoreceu os genótipos, destacando o genótipo Híbrido de Timor UFV 376-31. Destacaram-se entre os genótipos avaliados os Híbridos de Timor UFV 377-21, UFV 376-31 e a cultivar IPR100, que apresentaram adaptações que permitiram a manutenção do *status* hídrico em fase de desenvolvimento inicial. As principais estratégias de adaptação foram a manutenção de trocas gasosas, potencial hídrico na antemanhã, indução do sistema antioxidante e manutenção da condutividade hidráulica.

Palavras-chave: Cafeeiro. Tolerância à seca. Adaptação.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the responses of *Coffea arabica* L. genotypes to water deficit, through physiological, biochemical and leaf anatomical characteristics. The experiment was set in a greenhouse at the EPAMIG Experimental Station in Lavras-MG. Seven accessions of *Coffea arabica* L. from the Germplasm Bank of EPAMIG in Patrocínio-MG were used, in addition to two cultivars, one considered tolerant (IPR 100) and the other sensitive (Rubi MG1192) to water deficit. The genotypes were subjected to two water treatments, the first maintaining soil moisture at field capacity and the second with total suspension of irrigation. The experimental design used was in randomized blocks, in a 9x2 factorial scheme (genotypes x water treatment). For each treatment, four replicates were considered and each experimental plot consisted of one plant. As for the physiological characteristics, gas exchange and predawn water potential were evaluated. Regarding biochemical characteristics, the levels of hydrogen peroxide (H₂O₂) and malondialdehyde (MDA) were evaluated, besides the activity of catalase (CAT), superoxide dismutase (SOD), ascorbate peroxidase (APX) and ascorbate content (AsA). The leaf anatomical characteristics evaluated were: adaxial cuticle thickness (CUT), leaf blade thickness (LIM), stomatal density (DEN), relationship between polar and equatorial diameter (DPDE), phloem area (AF); area (AX), diameter (DX), vessel frequency (FVX) of the xylem, relative hydraulic conductivity (CHR) and vulnerability index (IV). Physiological and biochemical evaluations were performed in three distinct periods: at the beginning of the water treatment, when the plants were at field capacity; at 25 days after the imposition of water deficit (DAIDH) and in the recovery of genotypes, 17 days after rehydration. Leaf anatomical evaluations were carried out at the end of the experimental period. The obtained results showed different responses of the genotypes in relation to the physiological, biochemical and anatomical characteristics of the leaves evaluated as a function of water stress. There was a distinction between irrigated and non-irrigated genotypes at 25 DAIDH; there was a reduction in gas exchange and predawn water potential. After rehydration, recovery in gas exchange was observed in most of the evaluated genotypes. During water stress (25 DAIDH), the induction of the antioxidant system was observed in some genotypes, highlighting cultivar IPR100. As for leaf anatomy, it was verified in the non-irrigated treatment that the increment in the thickness of the CUT, in the DPDE relation, besides the smaller IV and the maintenance of CHR favored the genotypes, highlighting genotype 'Híbrido de Timor UFV 376-31'. Among the evaluated genotypes, 'Híbrido de Timor UFV 377-21', 'UFV 376-31' and cultivar IPR100 stood out, showing adaptations that allowed the maintenance of water status in the initial development. The main adaptation strategies were the maintenance of gas exchange, predawn water potential, induction of the antioxidant system and maintenance of hydraulic conductivity.

Keywords: Coffee tree. Drought tolerance. Adaptation.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas provocaram aumento de temperatura e alterações nas distribuições de chuvas com períodos secos prolongados. As projeções indicam que a frequência e a severidade de condições adversas devem aumentar nos próximos anos

(DUBBERSTEIN *et al.*, 2020; HASSAN *et al.*, 2021; MOAT *et al.*, 2017; THIOUNE *et al.*, 2020). O deficit hídrico é o principal estresse abiótico e prejudica o crescimento, desenvolvimento e a produtividade das culturas (CANALES *et al.*, 2021; KAPOOR *et al.*, 2020). Na cafeicultura, a limitação hídrica pode tornar regiões produtoras inaptas ao cultivo, extinguir espécies nativas, além de favorecer ataque de pragas e doenças (DAVIS *et al.*, 2012; MOAT *et al.*, 2017; RUIZ-CÁRDENAS, 2015).

As consequências da escassez de água são, num primeiro momento, pronunciadas nas folhas, uma vez que estas são um dos principais órgãos vegetativos (HASANAGIC *et al.*, 2020). Para evitar a transpiração excessiva ocorre o fechamento dos estômatos, resultando numa redução da assimilação de CO₂ e da fotossíntese (TORRE *et al.*, 2021). Além disso, pode ser gerado um desequilíbrio entre a absorção de luz e sua utilização, levando a superprodução de espécies reativas de oxigênio (EROs), que causam danos às estruturas celulares, podendo até mesmo acarretar a morte da planta (BARBOSA *et al.*, 2014; HASANUZZAMAN *et al.*, 2020).

No entanto, as plantas são capazes de se adaptarem às condições adversas como a restrição hídrica. Para tanto, há a indução de mecanismos fisiológicos, bioquímicos e anatômicos, que permitem a planta manter suas funções (HASSAN *et al.*, 2021; OSAGA *et al.*, 2013). As respostas ao estresse hídrico podem variar dentre espécies e genótipos de uma mesma espécie, tornando alguns mais adaptados a essa condição (CANALES *et al.*, 2021).

Nesse sentido, a identificação de genótipos tolerantes ao deficit hídrico é de fundamental importância. O Banco Ativo de Germoplasma da EPAMIG é composto por cerca de 1500 acessos, dentre eles o germoplasma de Híbrido de Timor (CARVALHO *et al.*, 1991). Este híbrido foi identificado no Timor Leste, antiga colônia portuguesa de Timor. Sua origem possivelmente foi de uma hibridação natural entre as espécies de *Coffea arabica* e *Coffea canephora* (BETTENCOURT; RODRIGUES, 1988). Os acessos Híbrido de Timor têm sido frequentemente utilizados em programas de melhoramento genético do cafeeiro visando a resistência a doenças (CLARINDO *et al.*, 2013). No entanto, há necessidade de estudos que explorem seu potencial para a tolerância a estresses abióticos.

Assim, a compreensão dos mecanismos que envolvem a tolerância à seca se faz necessária para a identificação de genótipos tolerantes e posterior desenvolvimento de cultivares. Neste sentido, objetivou-se com o presente trabalho, avaliar as respostas de genótipos de *Coffea arabica* L. submetidos ao deficit hídrico, por meio de características fisiológicas, bioquímicas e anatômicas foliares.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material vegetal

Foram utilizados 7 acessos de *Coffea arabica* L. do Banco Ativo de Germoplasma (BAG) da EPAMIG em Patrocínio-MG, selecionados com base em parâmetros de produtividade, qualidade de bebida e resistência a doenças, além de duas cultivares consideradas como tolerantes (IPR 100) (CARVALHO *et al.*, 2017), e a outra, como sensível (Rubi MG1192) (FREIRE *et al.*, 2013) à deficiência hídrica (TABELA 1).

Tabela 1 - Identificação e genealogia de genótipos do Banco Ativo de Germoplasma da EPAMIG em Patrocínio-MG.

Genótipo	Identificação no BAG-EPAMIG	Genealogia
1	MG 270 ¹	Híbrido Timor UFV 377-21
2	MG 270 ²	Híbrido Timor UFV 377-21
3	MG 364	Híbrido Timor UFV 442-42
4	MG 534	BE 5 Wush-Wush x Híbrido Timor UFV 366-08
5	MG 311	Híbrido Timor UFV 428-02
6	MG 279	Híbrido Timor UFV 376-31
7	MG 308	Híbrido de Timor UFV 427- 55
8	Rubi MG1192	Catuaí e Mundo Novo
9	IPR 100	“Catuaí” x cafeeiro (“Catuaí” x genótipo de café da série ‘BA-10’) portador de genes de <i>C. liberica</i> .

¹ MG 270 bloco 1; ² Seleção de plantas (1, 3 e 6) do acesso MG 270 no bloco 2.

Fonte: Da autora (2021).

O BAG foi instalado em 2005, no Campo Experimental da EPAMIG, localizado em Patrocínio-MG - região do Alto Paranaíba, situado a 18°59'26" de latitude Sul, 48°58'95" de longitude Oeste e altitude local de aproximadamente mil metros. O solo é do tipo Latossolo Vermelho-amarelo e a topografia é plana, com ligeira inclinação (SANTOS *et al.*, 2013). O clima do município de Patrocínio é classificado como Clima Subtropical Úmido, com inverno seco e estação chuvosa no verão (Cwb), segundo Koppen (ALVARES *et al.*, 2013).

2.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados e o ensaio foi constituído por 18 tratamentos, em esquema fatorial 9x2 (genótipos x tratamentos hídricos, G x TH). Para as análises fisiológicas e anatômicas foliares foram consideradas quatro repetições,

e para as análises bioquímicas foram consideradas três repetições, com uma planta por parcela experimental.

2.3 Formação das mudas e tratamento hídrico

Para a formação das mudas, as sementes dos acessos selecionados foram colhidas no ano de 2017, e germinadas em areia, até atingirem o estágio de emissão de folhas cotiledonares ('orelha de onça'), quando foram transplantadas para tubetes de 120 ml, contendo substrato para plantas à base de casca de pinus, turfa, vermiculita expandida, enriquecido com macro e micronutrientes da marca Tropstrato HT. Posteriormente, foram mantidas em viveiro até apresentarem quatro pares de folhas verdadeiras e aclimatadas.

Após esse período, as mudas foram transferidas para vasos de polietileno de 20 litros, contendo o substrato de uma mistura de 3 partes de subsolo, 1 parte de areia e 1 parte de esterco bovino (3:1:1). As mudas foram mantidas em casa de vegetação por um período de onze meses, na Estação Experimental da EPAMIG, em Lavras-MG, município localizado na latitude de 21°14'30'' Sul e longitude de 45°00'10'' Oeste, na altitude de 918,84 m (Coordenadas da Estação Climatológica Principal de Lavras, vinculada ao INMET – Instituto Nacional de Meteorologia).

A adubação foi realizada de acordo com a análise do substrato, seguindo as recomendações de Guimarães *et al.* (1999). Os tratamentos fitossanitários foram realizados preventivamente para o controle das principais pragas e doenças da cultura na região.

As plantas foram irrigadas de forma a manter o solo com 100% de água disponível por onze meses, sendo que em abril de 2019 foram submetidas ao tratamento hídrico. No primeiro tratamento hídrico as plantas foram mantidas com o solo a 100% da água disponível de abril de 2019 até o final do período experimental (Irigado - I) e, no segundo tratamento, houve suspensão total da irrigação (Não irrigado - NI) até que a maioria das plantas não irrigadas atingissem o potencial hídrico de antemã de -3MPa (BRUM *et al.*, 2013). Quando as plantas atingiram esse potencial hídrico, o que ocorreu após 33 dias da imposição do estresse, retornou-se à irrigação, mantendo-as novamente com 100% de água disponível no solo.

2.4 Obtenção de dados microclimáticos

O monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar, no interior da casa de vegetação, foi realizado diariamente durante o período experimental com o auxílio do aparelho da marca ACU-RITE.

2.5 Área foliar

A área foliar (AF – cm²) foi determinada no início do período experimental, pelas dimensões do retângulo circunscrito aos limbos foliares (BARROS *et al.*, 1973) em todas as folhas das plantas. Posteriormente o resultado obtido foi ajustado pela equação:

$$Y = 0.667. X \quad \textcircled{N}$$

Onde:

Y – representa a área foliar;

X – área do retângulo circunscrito ao limbo foliar (produto entre comprimento e largura da folha) (BARROS *et al.*, 1973).

2.6 Avaliações fisiológicas

As avaliações fisiológicas e bioquímicas ocorreram em três períodos distintos: a) ao iniciar o tratamento hídrico, quando as plantas estavam em condição de 100% de água disponível no solo; b) aos 25 dias após a imposição do deficit hídrico (DAIDH), quando os genótipos apresentaram variabilidade em relação ao estresse hídrico; e c) aos 17 dias após o retorno da irrigação do tratamento hídrico não irrigado, com a finalidade de verificar a recuperação dos genótipos.

Para todas as avaliações foram utilizadas folhas completamente expandidas do terceiro ou quarto par do ramo plagiotrópico, na parte mediana da planta.

2.7 Trocas gasosas

A avaliação de trocas gasosas foi realizada no período entre 8 e 11 horas da manhã, sob luz artificial (1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), com o auxílio de um sistema portátil de análise de gases infravermelho (IRGA LICOR – 6400XT), onde obteve-se a taxa fotossintética líquida (A -

$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática ($\text{gs} - \text{mol H}_2\text{O m}^{-1} \text{ s}^{-1}$), taxa transpiratória ($E - \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e eficiência instantânea do uso da água ($\text{EUA} - \mu\text{mol CO}_2 / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (A/E).

2.8 Potencial hídrico na antemanhã

Para determinação do potencial hídrico utilizou-se uma câmara de pressão tipo Scholander (PMS Instruments Plant Moisture- Modelo 1000), e as avaliações foram realizadas antes do amanhecer (potencial hídrico de antemanhã).

2.9 Análises bioquímicas

Para as análises bioquímicas, coletou-se as folhas no período da tarde, entre 12 e 13h, que foram acondicionadas em nitrogênio líquido e armazenadas em ultra freezer ($-80\text{ }^\circ\text{C}$), para posterior maceração e obtenção dos extratos.

2.10 Quantificação de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e peroxidação lipídica

Para a quantificação de H_2O_2 foram macerados 100 mg do material vegetal em nitrogênio líquido e polivinilpolipirrolidona (PVPP) e homogeneizado em ácido tricloacético (TCA) 0.1% (m/v). As amostras foram centrifugadas a 12000g por 15 minutos, a $4\text{ }^\circ\text{C}$. Posteriormente, coletou-se o sobrenadante e as alíquotas foram adicionadas ao meio de reação composto por tampão fosfato de potássio (10Mm, pH 7.0) e iodeto de potássio (1M). A concentração de H_2O_2 foi determinada pela absorbância das amostras a 390nm, utilizando a curva-padrão de concentrações de H_2O_2 conhecidas (VELIKOVA; YORDANOV; EDREVA, 2000), com modificações.

Determinou-se a peroxidação lipídica por meio da quantificação de espécies reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBA), conforme metodologia proposta por Buege e Aust (1978). As alíquotas foram adicionadas ao meio de reação composto por 0.5% (m/v) de ácido tiobarbitúrico (TBA) e 10% (m/v) de TCA. Em seguida, o meio foi incubado a $95\text{ }^\circ\text{C}$, por 30 minutos. A reação foi paralisada por resfriamento rápido em gelo e as leituras realizadas a 535 nm e 600 nm. O TBA forma complexos de cor avermelhada, como o malondialdeído (MDA), produto secundário do processo de peroxidação. A concentração do MDA foi calculada pela seguinte equação: $[\text{MDA}] = (A_{535} - A_{600}) / (\xi \times b)$, em que ξ (coeficiente de extinção molar = $1,56 \times 10^5$

⁵); b (comprimento ótico = 1). A peroxidação foi expressa em mmol de MDA.g⁻¹(MF – massa fresca).

2.11 Metabolismo antioxidante

Para a determinação da atividade das enzimas do sistema antioxidante foram macerados 100 mg do material vegetal em nitrogênio líquido e polivinilpolipirrolidona (PVPP), posteriormente homogeneizado com 3.5 mL do seguinte tampão de extração: fosfato de potássio 100 mM (pH 7.8), EDTA 0.1 mM e ácido ascórbico 10 mM. O extrato foi centrifugado a 13.000 g por 10 min, a 4 °C. Os sobrenadantes foram coletados e utilizados para as análises das enzimas: catalase (CAT), dismutase do superóxido (SOD) e peroxidase do ascorbato (APX) (BIEMELT; KELTMAN; ALBERT, 1980).

Para a determinação da atividade da CAT utilizou-se o protocolo de Mengutay *et al.* (2013) com modificações. As alíquotas das amostras foram adicionadas ao meio de incubação, composto por tampão fosfato (45 mM, pH 7.6), Na₂EDTA (0.1 mM) (dissolvido no tampão fosfato) e peróxido de hidrogênio (10mM). A atividade da enzima foi determinada pelo decréscimo na absorbância a 240 nm, a cada 15 segundos, por 3 minutos, monitorado pelo consumo de peróxido de hidrogênio. O coeficiente de extinção molar utilizado foi 36 mM⁻¹cm⁻¹.

A atividade da SOD foi avaliada pela capacidade da enzima em inibir a fotorredução do azul de nitrotetrazólio (NBT), de acordo com a metodologia proposta por Giannopolis e Ries (1977) com modificações. As alíquotas das amostras foram adicionadas ao meio de incubação composto por fosfato de potássio (50 mM, pH 7.8), metionina (14 mM), EDTA (0.1 μM), NBT (75 μM), riboflavina (2 μM) e água destilada. Posteriormente, as microplacas foram iluminadas com lâmpada fluorescente de 20 W por sete minutos e realizaram-se as leituras a 560 nm. Uma unidade da SOD corresponde à quantidade de enzima necessária para inibir em 50% a fotorredução do NBT nas condições do ensaio.

A atividade da APX foi determinada pelo acompanhamento da taxa de oxidação do ascorbato a 290 nm, a cada 15 segundos, por 3 minutos, de acordo com a metodologia proposta por Nakano e Asada (1981), com modificações. As alíquotas das amostras foram adicionadas ao meio de incubação contendo tampão fosfato de potássio (50 mM, pH 6.0), ácido ascórbico (0.8 mM) e peróxido de hidrogênio (1 mM). O coeficiente de extinção molar utilizado foi 2.8mM⁻¹cm⁻¹ (NAKANO; ASADA, 1981).

2.12 Quantificação do ascorbato

Para a quantificação de ascorbato (AsA) utilizou-se 50 mg do material vegetal, que foram macerados em nitrogênio líquido e polivinilpolipirrolidona (PVPP) e homogeneizado com ácido tricloroacético (TCA 5%) (m/v). Em seguida, centrifugado a 10.000 g por 15 min, a 4° C. Posteriormente, as alíquotas das amostras foram adicionadas ao meio de reação composto por TCA (5% - m/v), etanol (99.8% - v/v), ácido ascórbico, ácido fosfórico (H₃PO₄) (0.4% em etanol - v/v), bathophenantrolina (0.5% em etanol - p/v) e cloreto de ferro (III) (FeCL₃) (0.03% em etanol - m/v). Depois, este meio foi homogeneizado e incubado a 30 °C, por 90 minutos. Realizou-se as leituras das amostras a 534 nm, utilizando a curva-padrão com concentrações conhecidas (ARAKAWA *et al.*, 1981).

Para todas as análises bioquímicas utilizou-se microplacas de microtitulação de 96 poços e as leituras foram realizadas em leitora de microplacas por multidetecção Synergy TM HTX.

2.13 Anatomia foliar

Para a análise da anatomia foliar, as folhas foram coletadas ao final do período experimental, posteriormente foram fixadas em álcool 70% (v v⁻¹) (JOHANSEN, 1940) e, após 72 horas, colocadas em nova solução de álcool 70% (v v⁻¹), visando a conservação do material, em temperatura ambiente até a data 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 micrótomato 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 secções paradérmicas foliares foram obtidas por meio da impressão da epiderme pelo método impressão com adesivo instantâneo universal (éster de cianoacrilato) (Super Bonder[®]) (SEGATTO *et al.*, 2004).

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

As características avaliadas nas seções 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 (FL - μm^2), frequência dos vasos do xilema (FVX = NVX/AX*1000000, mm^2), índice de vulnerabilidade dos vasos do xilema (IV = DVX/ FVX) conforme proposto por Carlquist (1988). A condutividade hidráulica relativa (CHR) foi estimada usando equação de Hagen - Poiseuille modificada por Fahn *et al.*, (1986), onde: $\text{CHR} = r^4 * \text{FVX}$, $\mu^4\text{m}^410^6$, onde r é o raio individual dos vasos xilemáticos (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

Para as seções paradérmicas foram analisados: densidade estomática (DEN - número de estômatos/ mm^2) e os diâmetros polar e equatorial do estômato onde obteve-se a relação diâmetro polar/diâmetro equatorial dos estômatos (DPDE).

2.14 Análises estatísticas

As análises dos dados foram realizadas no programa Genes (CRUZ, 2013) e as médias obtidas foram comparadas entre si pelo teste Scott-Knott, quando observada a significância pelo teste F ($p \leq 0.05$).

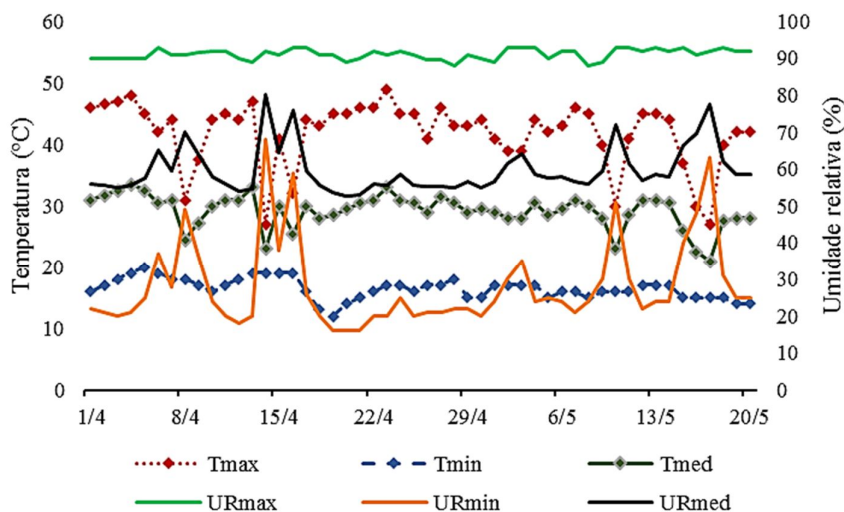
Para verificar a distinção entre os genótipos, além da correlação entre as características avaliadas durante o estresse hídrico (25 DAIDH), e após a reidratação dos genótipos, utilizou-se a análise de componentes principais. Os valores médios foram padronizados de forma a ter média zero e variância unitária, utilizando-se a biblioteca FactoMineR e o software R (R CORE TEAM, 2019).

3 RESULTADOS

3.1 Dados microclimáticos

A condição climática no interior da casa de vegetação no período experimental é representada na Figura 1. No início do período experimental (01/04) a temperatura e a umidade relativa média foram de 31 °C e 56%, respectivamente. Aos 25 DAIDH (26/04), quando os genótipos avaliados apresentaram variabilidade em relação ao estresse hídrico, verificou-se temperatura média de 29 °C e 55% de umidade relativa do ar (FIGURA 1).

Figura 1 - Temperatura (T °C) e umidade relativa (UR %) do ar no interior da casa de vegetação durante o período experimental.



Fonte: Da autora (2021).

Interessante observar que a temperatura máxima registrada no período experimental oscilou por volta de 42 °C (FIGURA 1).

Após a reidratação dos genótipos, no dia 20/05, a temperatura e a umidade relativa média registrada foram de 28 °C e 59%, respectivamente (FIGURA 1).

3.2 Área foliar

A área foliar dos genótipos avaliados é apresentada na Tabela 2. Observou-se distinção entre os genótipos, resultando na formação de três grupos. As plantas dos genótipos 1 e 2 apresentaram maior área foliar, seguidos pelas plantas dos genótipos 3, 6 e 9 no segundo grupo. Já as plantas dos genótipos 4, 5, 7 e 8 apresentaram menor área foliar (TABELA 2).

Tabela 2 - Valores médios de área foliar (AF, cm²) avaliada em genótipos de *Coffea arabica* L. obtidos antes da imposição do déficit hídrico.

Genótipo	AF
1	2129.35 a
2	2158.85 a
3	1749.12 b
4	1375.06 c
5	1038.96 c
6	1542.19 b
7	876.84 c
8	1192.64 c
9	1725.14 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 probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

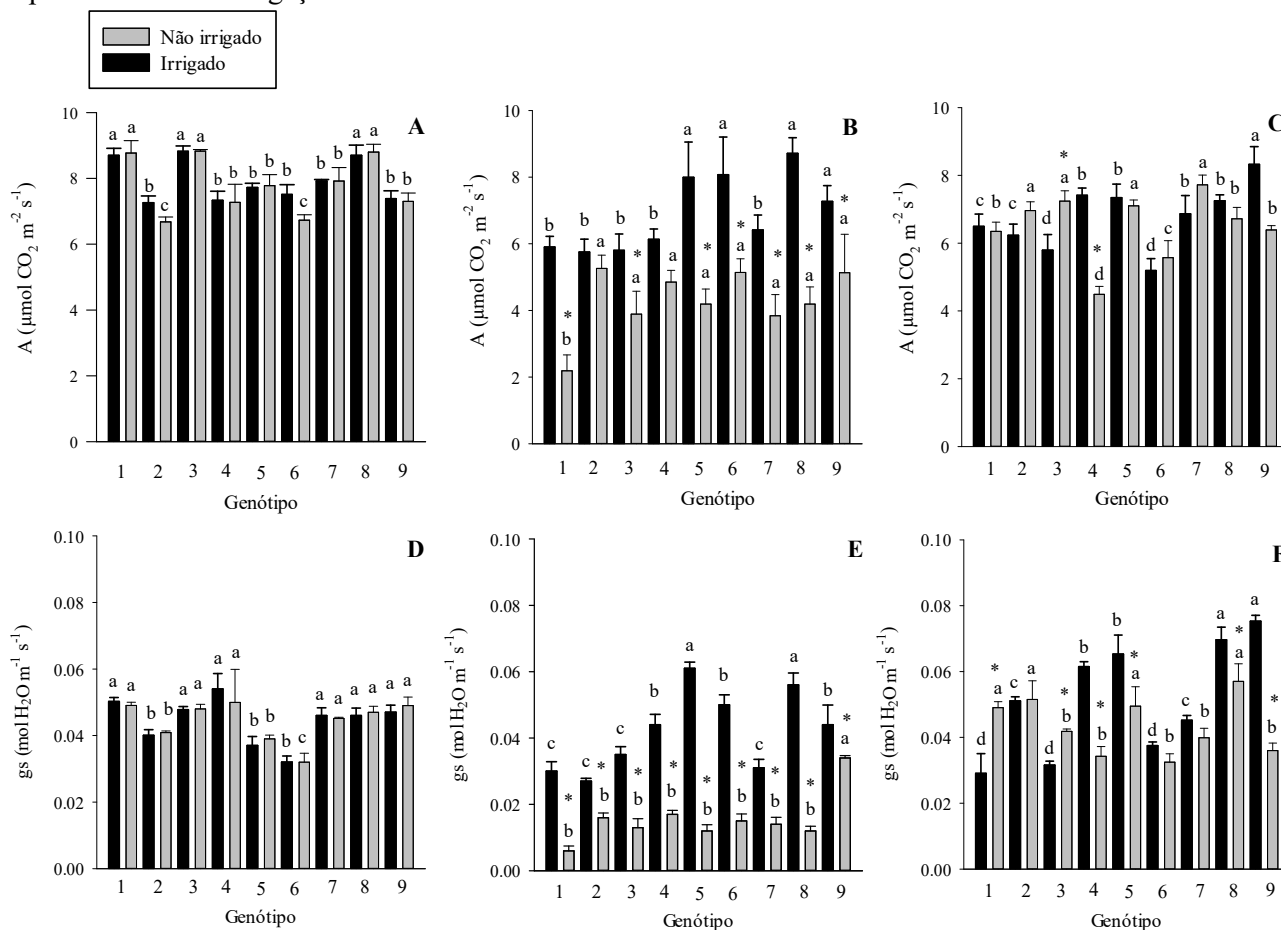
3.3 Análises fisiológicas

Na primeira avaliação, observou-se variabilidade nos genótipos avaliados quanto à taxa fotossintética líquida (A), bem como para condutância estomática (gs), sendo os maiores valores médios para ambas as características, observadas nas plantas dos genótipos 1, 3 e 8 (FIGURA 2A e D)

Após a imposição do déficit hídrico, verificou-se redução, tanto na A, quanto na gs dos genótipos submetidos à suspensão da irrigação. De maneira geral, houve redução na gs em todos os genótipos avaliados. As plantas do genótipo 1 foram mais afetadas, com redução de 79% na A e 80% na gs em relação ao controle irrigado. Em contraste, as plantas dos genótipos 2 e 4 não tiveram a A afetada pelo déficit hídrico (FIGURAS 2B e E).

Aos 17 dias após o retorno da irrigação, de maneira geral houve recuperação na A dos genótipos não irrigados, com exceção do genótipo 4. Menores valores de gs foram observados nas plantas dos genótipos 4, 5, 8 e 9, em condição de estresse, quando comparados ao controle irrigado. Já nas plantas do genótipo 1 verificou-se incremento na gs dos genótipos não irrigados, em relação ao controle irrigado (FIGURAS 2C e F).

Figura 2 - Valores médios de taxa fotossintética líquida (A) e condutância estomática (gs) de genótipos de *Coffea arabica* L. submetidos ao déficit hídrico. A e D – início do período experimental; B e E – 25 dias após a imposição do déficit hídrico; C e F – reidratação dos genótipos, 17 dias após o retorno da irrigação.



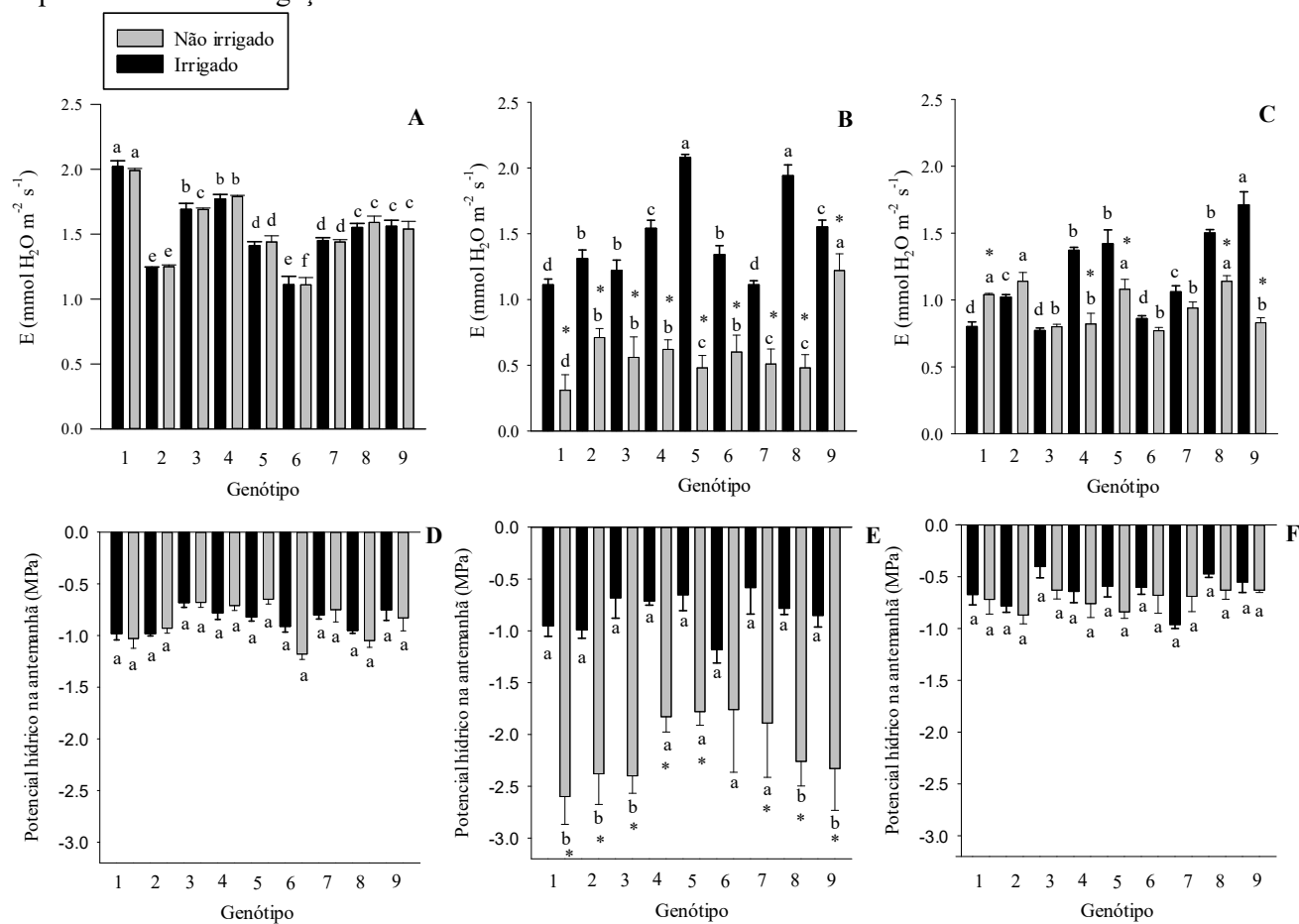
Médias seguidas da mesma letra minúscula comparam os genótipos dentro do tratamento hídrico e * compara tratamentos hídricos dentro de cada genótipo, de acordo com o teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

Quanto à taxa transpiratória (E), no início do período experimental, observou-se maiores valores médios nas plantas do genótipo 1 e menores valores nas plantas dos genótipos 2 e 6 (FIGURA 3 A). Aos 25 dias após a imposição do deficit hídrico, houve redução média de 59% na E nos genótipos avaliados em relação ao controle irrigado. Menores valores dessa característica foram observados nas plantas do genótipo 1, seguidos pelos genótipos 5, 7 e 8 (FIGURA 3 B). Quanto ao potencial hídrico na antemanhã menores valores foram verificados nas plantas dos genótipos 1, 2, 3, 8 e 9 (FIGURA 3 E).

Aos 17 dias após o retorno da irrigação, verificou-se recuperação da E na maioria dos genótipos avaliados, com exceção do 4, 5, 8 e 9. Por outro lado, observou-se incremento na E nas plantas do genótipo 1, em relação ao controle irrigado. No que se refere ao potencial hídrico de antemanhã houve recuperação de todos os genótipos avaliados (FIGURA 3 C e F).

Figura 3 - Valores médios de taxa transpiratória (E) e potencial hídrico na antemanhã de genótipos de *Coffea arabica* L. submetidos ao deficit hídrico. A e D – início do período experimental; B e E – 25 dias após a imposição do deficit hídrico; C e F – reidratação dos genótipos, 17 dias após o retorno da irrigação.



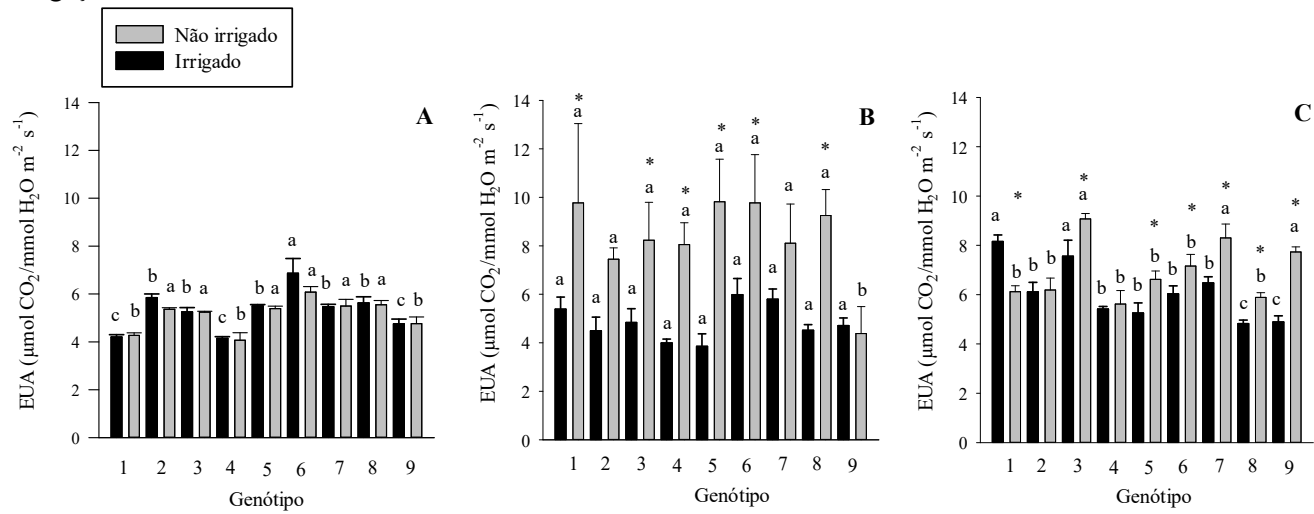
Médias seguidas da mesma letra minúscula comparam os genótipos dentro do tratamento hídrico e * compara tratamentos hídricos dentro de cada genótipo, de acordo com o teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

No que se refere a eficiência instantânea no uso da água, no início do período experimental, maiores valores médios foram observados nas plantas do genótipo 6 e menores valores médios nas plantas dos genótipos 1 e 4. Aos 25 dias após a imposição do déficit hídrico, observou-se incremento dessa característica nos genótipos submetidos ao tratamento hídrico não irrigado, sendo que as plantas dos genótipos 1, 3, 4, 5, 6 e 8 apresentaram valores médios superiores ao controle irrigado (FIGURA 4).

Após a reidratação dos genótipos, observou-se maiores valores médios de eficiência instantânea no uso da água nas plantas dos genótipos 3, 5, 6, 7, 8 e 9, em relação ao controle irrigado. Em contrapartida, as plantas do genótipo 1 não irrigado apresentaram valor de EUA inferior ao controle irrigado (FIGURA 4).

Figura 4 - Valores médios de eficiência instantânea no uso da água de genótipos de *Coffea arabica* L. submetidos ao deficit hídrico. A e D – início do período experimental; B e E – 25 dias após a imposição do deficit hídrico; C e F – reidratação dos genótipos, 17 dias após o retorno da irrigação.



Médias seguidas da mesma letra minúscula comparam os genótipos dentro do tratamento hídrico e * compara tratamentos hídricos dentro de cada genótipo, de acordo com o teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

3.4 Análises bioquímicas

Para as características de peróxido e peroxidação lipídica não foram observadas diferenças significativas para o tratamento hídrico e para a interação entre G x TH. No entanto, houve variabilidade para essas características em relação aos genótipos avaliados (TABELA 3).

Tabela 3 - Níveis de peróxido de hidrogênio (H_2O_2 - mmol H_2O_2 g⁻¹ MF) e de malondialdeído (MDA - mmol MDA g⁻¹ MF) de genótipos de *Coffea arabica* L. submetidos ao deficit hídrico em três avaliações distintas¹.

Genótipo	H_2O_2			MDA		
	1	2	3	1	2	3
1	86.69 a	74.66 a	60.80 b	1.25 a	1.03 a	5.19 a
2	69.26 a	69.42 a	66.57 b	1.45 a	0.98 a	4.27 a
3	58.35 b	78.12 a	69.46 b	1.04 b	1.06 a	4.74 a
4	71.15 a	88.56 a	118.33 a	0.91 b	0.49 b	4.61 a
5	55.86 b	68.83 a	61.11 b	0.84 c	1.01 a	3.45 b
6	56.71 b	52.04 b	60.67 b	1.01 b	0.77 b	2.92 b
7	65.57 a	69.84 a	57.37 b	0.79 c	1.03 a	2.59 b
8	52.96 b	64.24 b	50.24 b	0.76 c	1.20 a	2.24 c
9	50.21 b	57.60 b	48.95 b	0.63 c	0.98 a	1.75 c

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 probabilidade. (¹) Avaliações: 1 – início do período experimental; 2- 25 dias após a imposição do deficit hídrico (DAIDH); 3 - reidratação dos genótipos, 17 dias após o retorno da irrigação.

Fonte: Da autora (2021).

Na primeira avaliação, verificou-se maiores níveis médios de H_2O_2 nas plantas dos genótipos 1, 2, 4 e 7. As plantas dos genótipos 1 e 2 também apresentaram maiores níveis de peroxidação lipídica em relação aos demais (TABELA 3).

Durante o estresse hídrico aos 25 DAIDH, observou-se menores níveis de H_2O_2 nas plantas dos genótipos 6, 8 e 9. Além disso, nas plantas dos genótipos 6 e 4 verificou-se menores níveis de peroxidação lipídica em relação aos demais (TABELA 3).

Após o retorno da irrigação, avaliando a recuperação dos genótipos, observou-se maiores níveis de H_2O_2 e peroxidação lipídica nas plantas do genótipo 4, em relação aos demais. Em contrapartida, verificou-se menores níveis dessas características nas plantas dos genótipos 5, 6, 7, 8 e 9 (TABELA 3).

Para a atividade das enzimas catalase e SOD, na primeira avaliação observou-se diferença significativa somente para os genótipos avaliados. As plantas do genótipo 9 permaneceram com o maior valor médio da atividade da CAT em relação aos demais. Já para a atividade da SOD, verificou-se incremento da atividade dessa enzima nas plantas do genótipo

1NI e redução nas plantas dos genótipos 3NI e 7NI em relação ao controle irrigado (TABELA 4).

Tabela 4 - Atividade das enzimas catalase (CAT - $\mu\text{M H}_2\text{O}_2 \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ MF}$) e superóxido dismutase (SOD - U SOD $\text{min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ MF}$) de genótipos de *Coffea arabica* L. submetidos ao déficit hídrico em três avaliações distintas¹.

Genótipo	CAT			SOD				
	1	2	3	1	2	3		
	I	NI		I	NI			
1	0.011 c	0.009 b A	0.010 d A	0.004 b	0.47 b	0.61 b B	0.70 a A	0.41 b
2	0.013 c	0.004 b B	0.014 c A	0.005 b	0.48 a	0.74 a A	0.70 a A	0.43 a
3	0.020 b	0.007 b B	0.020 c A	0.009 a	0.49 a	0.76 a A	0.65 a B	0.43 a
4	0.022 b	0.008 b B	0.030 b A	0.011 a	0.49 a	0.72 a A	0.68 a A	0.45 a
5	0.014 c	0.006 b A	0.009 d A	0.011 a	0.49 a	0.69 a A	0.65 a A	0.45 a
6	0.023 b	0.007 b B	0.015 c A	0.005 b	0.48 b	0.67 b A	0.72 a A	0.41 b
7	0.021 b	0.016 a B	0.031 b A	0.013 a	0.47 b	0.63 b A	0.52 c B	0.38 b
8	0.018 b	0.009 b B	0.016 c A	0.006 b	0.47 b	0.59 b A	0.62 b A	0.38 b
9	0.030 a	0.017 a B	0.039 a A	0.008 a	0.45 c	0.62 b A	0.60 b A	0.38 b

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 probabilidade. (¹) Avaliações: 1 – início do período experimental; 2- 25 dias após a imposição do déficit hídrico (DAIDH); 3 - reidratação dos genótipos, 17 dias após o retorno da irrigação. I- Irrigado, NI- Não irrigado.

Fonte: Da autora (2021).

Aos 25 DAIDH, houve aumento da atividade da enzima catalase nos genótipos não irrigados em relação ao controle irrigado. Destacaram-se as plantas do genótipo 9 com maior atividade dessa enzima, seguido pelas plantas dos genótipos 4 e 7 que permaneceram no segundo grupo de acordo com o agrupamento do teste Scott-Knott. Quanto à atividade da enzima SOD, incremento no genótipo 1NI em relação ao controle irrigado, manutenção da atividade da enzima nas plantas dos genótipos 2, 4, 5, 6, 8 e 9. Em contrapartida, observou-se redução da atividade dessa enzima nas plantas dos genótipos 3 e 7, quando não irrigados (TABELA 4).

Na terceira avaliação, maior atividade da CAT foi verificada nos genótipos não irrigados (TABELA 5), no entanto, não houve diferença significativa para a interação G x TH. Verificou-se maiores valores médios da atividade da CAT nas plantas dos genótipos 3, 4, 5, 7 e 9 (TABELA 4).

Tabela 5 - Atividade da enzima catalase (CAT - $\mu\text{M H}_2\text{O}_2 \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ MF}$) em relação ao tratamento hídrico, 17 dias após o retorno da irrigação.

TH	CAT
I	0.006 b
NI	0.010 a

TH- Tratamento hídrico, I- Irrigado, NI- Não irrigado. Médias seguidas da mesma pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

Para a atividade da enzima SOD, na terceira avaliação, tal qual observado na atividade da CAT, não houve diferença significativa para a interação G x TH. Mas, verificou-se maiores valores médios da atividade dessa enzima nas plantas dos genótipos 2, 3, 4 e 5 (TABELA 4).

Quanto à atividade da enzima peroxidase do ascorbato (APX), na primeira avaliação observou-se variabilidade dentre os genótipos avaliados. Sendo que o menor valor médio foi observado no genótipo 1. Já para os níveis de ascorbato (AsA) não houve diferença entre os genótipos avaliados (TABELA 6).

Tabela 6 - Atividade da ascorbato peroxidase (APX - $\mu\text{M AsA min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ MF}$) e níveis de ascorbato (AsA - $\text{mg AsA g}^{-1} \text{ MF}$) em três avaliações distintas¹.

Genótipo	APX			AsA			
	1	2	3	1	2		3
					I	NI	
1	0.27 b	0.15 c	0.12 b	41.93 a	33.46 a B	54.68 a A	39.12 b
2	0.46 a	0.29 b	0.19 b	45.25 a	32.93 a B	50.74 a A	47.97 a
3	0.48 a	0.40 a	0.35 a	45.44 a	31.75 a B	42.42 b A	40.53 b
4	0.42 a	0.30 b	0.32 a	50.02 a	34.16 a A	39.40 b A	33.07 c
5	0.47 a	0.17 c	0.31 a	51.63 a	25.31 a B	37.83 b A	30.38 c
6	0.47 a	0.35 b	0.29 a	53.27 a	30.74 a A	35.11 b A	39.10 b
7	0.45 a	0.45 a	0.11 b	54.31 a	39.40 a A	25.37 c B	33.33 c
8	0.58 a	0.54 a	0.11 b	55.10 a	34.92 a B	44.63 a A	34.23 c
9	0.56 a	0.50 a	0.15 b	60.05 a	36.60 a A	40.36 b A	27.87 c

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 probabilidade. (1) Avaliações: 1 - início do período experimental; 2- 25 dias após a imposição do déficit hídrico (DAIDH); 3 - reidratação dos genótipos, 17 dias após o retorno da irrigação. I- Irrigado, NI - Não irrigado.

Fonte: Da autora (2021).

Na segunda e terceira avaliação, verificou-se maior atividade da enzima APX nos genótipos não irrigados. No entanto, não houve diferença significativa para a interação G x TH (TABELA 7). Maiores valores médios da atividade dessa enzima foram observados nas plantas dos genótipos 3, 7, 8 e 9 (TABELA 6).

Tabela 7 - Atividade da ascorbato peroxidase (APX - $\mu\text{M AsA min}^{-1} \text{mg}^{-1} \text{MF}$) na segunda e terceira avaliação¹ em relação ao tratamento hídrico.

TH	2	3
I	0.17 b	0.31 b
NI	0.26 a	0.40 a

TH- Tratamento hídrico, I- Irrigado, NI- Não irrigado. Médias seguidas da mesma pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade. (!) Avaliações: 2- 25 dias após a imposição do deficit hídrico (DAIDH); 3 – reidratação dos genótipos, 17 dias após o retorno da irrigação.

Fonte: Da autora (2021).

Para AsA, observou-se interação entre G x TH aos 25 DAIDH, com incremento nos genótipos não irrigados, sendo que as plantas dos genótipos 1, 2 e 8, os que apresentaram os maiores níveis médios. Já para as plantas dos genótipos 4, 6 e 9 não houve diferença em relação ao tratamento hídrico nos níveis de AsA (TABELA 6).

Após o retorno da irrigação, avaliando a recuperação dos genótipos, observou-se maior atividade da enzima APX nas plantas dos genótipos 3, 4, 5 e 6. Já para o conteúdo de AsA verificou-se maior valor médio nas plantas do genótipo 2 em relação aos demais (TABELA 6).

3.5 Características anatômicas foliares

Na Tabela 8, são apresentados os dados referentes ao limbo foliar (LIM) e espessura da cutícula da face adaxial (CUT). Sob condição de deficit hídrico houve redução na espessura do limbo foliar nas plantas dos genótipos 1 e 7, em relação ao controle irrigado. Houve incremento na espessura da cutícula de todos os genótipos mantidos sob deficit hídrico, onde destacaram-se com maior espessura dessa característica as plantas dos genótipos 3, 6, 7, 8 e 9, no tratamento hídrico não irrigado (TABELA 8).

Tabela 8 - Valores médios de limbo foliar (LIM - μm) e espessura da cutícula da face adaxial (CUT - μm) avaliados em genótipos de *Coffea arabica* L. submetidos ao deficit hídrico.

Genótipo	LIM		CUT	
	I	NI	I	NI
1	284.57 a A	264.27 b B	4.25 b B	4.33 b A
2	261.25 b A	243.26 c A	4.16 b B	4.36 b A
3	275.58 a A	290.63 a A	4.30 a B	4.54 a A
4	254.78 b A	256.68 c A	4.17 b B	4.39 b A
5	292.56 a A	273.21 b A	4.23 b B	4.36 b A
6	250.98 b A	266.60 b A	4.29 a B	4.49 a A
7	284.00 a A	234.64 c B	4.31 b B	4.40 a A
8	268.39 b A	252.09 c A	4.34 a B	4.49 a A
9	257.48 b A	267.60 b A	4.29 a B	4.49 a A

I- Irrigado, NI – Não irrigado. 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 probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

Em relação à densidade estomática, observou-se redução nas plantas dos genótipos 2, 4 e 5, sob condição de deficit hídrico. Para a relação entre diâmetro polar e equatorial dos estômatos (DPDE) observou-se incremento nas plantas dos genótipos 2, 5, 6 e 7 para o tratamento NI em relação ao controle irrigado. Em contrapartida, houve redução nessa característica nas plantas dos genótipos 4 e 9 (NI) (TABELA 9).

Tabela 9 - Valores médios de densidade estomática (número de estômatos/ mm^2) e relação entre diâmetro polar e equatorial de estômatos (DPDE) avaliados em genótipos de *Coffea arabica* L. submetidos ao deficit hídrico.

Genótipo	DEN		DPDE	
	I	NI	I	NI
1	145.84 b A	169.54 a A	1.66 d A	1.62 d A
2	221.21 a A	146.98 a B	1.57 e B	1.68 d A
3	137.06 b A	134.23 a A	1.81 b A	1.82 b A
4	253.25 a A	149.76 a B	1.62 d A	1.47 e B
5	249.65 a A	163.33 a B	1.57 e B	1.76 c A
6	148.94 b A	150.82 a A	1.74 c B	1.85 b A
7	125.56 b A	134.39 a A	1.57 e B	1.81 b A
8	146.78 b A	132.92 a A	1.89 a A	1.93 a A
9	122.13 b A	146.65 a A	1.83 b A	1.76 c B

I- Irrigado, NI – Não irrigado. 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 probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

Quanto aos vasos condutores, observou-se redução nas áreas do floema (FL) e do xilema (AX) nas plantas dos genótipos 2, 4, 6 e 9 em função do deficit hídrico. Em relação ao diâmetro

de vasos do xilema (DVX), houve redução na maioria dos genótipos não irrigados. Menores valores de DVX foram verificados nas plantas dos genótipos 4, 6, 7 e 8 (TABELA 9). Não houve diferença entre os tratamentos hídricos para a característica de frequência de vasos do xilema (FVX), no entanto, houve variabilidade entre os genótipos avaliados. Onde a maior FVX foi observada nas plantas do genótipo 9 e menor FVX nas plantas dos genótipos 2 e 5 (TABELA 10).

Tabela 10 - Valores médios de área do floema e xilema (FL, AX – μm^2), diâmetro (DVX - μm), frequência de vasos do xilema (FVX – vasos/ mm^2), índice de vulnerabilidade (IV) e condutividade hidráulica relativa (CHR - $\mu\text{m}^4 10^6$) avaliados em genótipos de *Coffea arabica* L. após o déficit hídrico.

Genótipo	FL		AX		DVX	
	I	NI	I	NI	I	NI
1	51875.96 c B	66535.36 b A	83092.85 b A	81809.89 c A	20.81 b A	18.55 a B
2	74331.77 a A	46505.81 c B	89211.08 b A	75982.88 c B	22.44 a A	18.91 a B
3	65331.60 b A	64711.45 b A	100853.65 a A	108319.15 a A	21.01 b A	19.40 a B
4	61073.10 b A	45441.96 c B	88089.04 b A	67863.15 d B	18.97 c A	16.97 b B
5	73908.88 a A	78604.87 a A	108687.52 a A	114681.79 a A	20.76 b A	18.44 a B
6	61998.12 b A	49730.23 c B	76511.01 c A	54944.85 e B	18.90 c A	16.77 b B
7	41257.48 d A	44772.87 c A	63531.22 d A	61310.92 e A	16.64 d A	15.76 b A
8	77484.30 a A	77080.59 a A	89641.63 b A	94602.96 b A	19.64 c A	16.44 b B
9	74632.88 a A	66253.69 b B	62938.12 d B	93127.56 b A	17.72 d A	17.79 a A

Genótipo	FVX	IV		CHR	
		I	NI	I	NI
1	1045.73 b	0.020 b A	0.022 a A	9.46 b A	6.53 b B
2	795.17 d	0.034 a A	0.021 a B	10.72 a A	8.15 a B
3	949.48 c	0.019 b A	0.023 a A	8.99 b A	8.15 a A
4	1110.96 b	0.017 c A	0.017 b A	8.63 b A	7.10 b B
5	783.68 d	0.024 b A	0.025 a A	7.10 c A	5.98 c B
6	977.11 c	0.019 b A	0.018 b A	7.03 c A	6.52 b A
7	949.78 c	0.016 c A	0.019 b A	5.38 d A	3.89 d B
8	998.31 c	0.021 b A	0.016 b B	8.63 b A	5.43 c B
9	1274.44 a	0.015 c A	0.017 b A	7.56 c A	6.73 b A

I- Irrigado, NI – Não irrigado. 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 probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

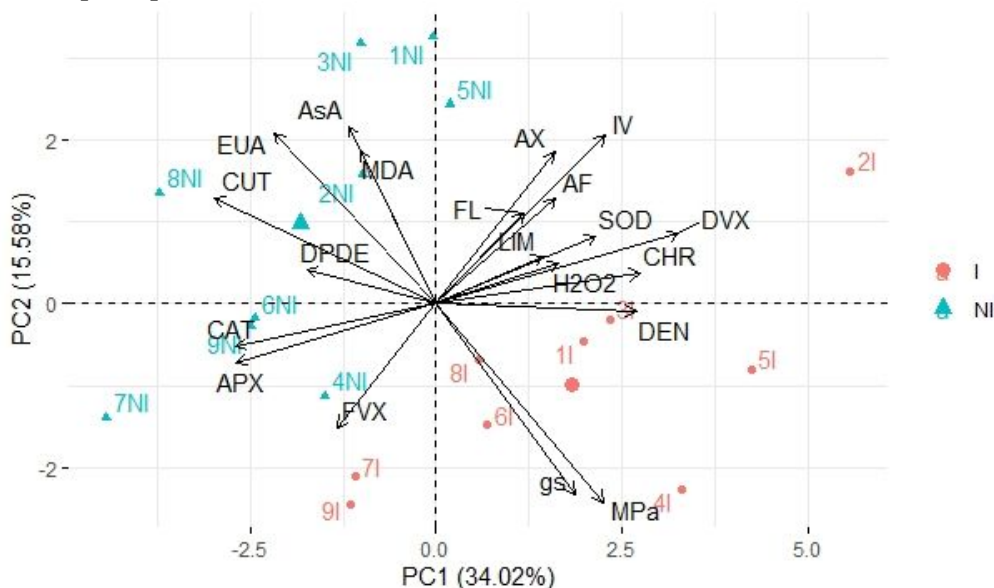
Quanto ao índice de vulnerabilidade dos vasos do xilema (IV), sob condição de déficit hídrico, observou-se redução dessa característica nas plantas dos genótipos 2 e 8, em relação ao controle irrigado. Dentre os genótipos não irrigados, maiores valores médios de IV foram observados nas plantas genótipos 1, 2, 3 e 5. Em contrapartida, menores valores médios de IV foram observados nas plantas dos genótipos 4, 6, 7, 8 e 9 (TABELA 10).

Sob condição de deficit hídrico, verificou-se redução na condutividade hidráulica relativa (CHR) na maioria dos genótipos avaliados. Sendo maiores valores médios observados nas plantas dos genótipos 2 e 3, e menor valor nas plantas do genótipo 7 (TABELA 10).

3.6 Dispersão de genótipos de *Coffea arabica* L. e correlação entre características fisiológicas, bioquímicas e anatômicas foliares, aos 25 dias após a imposição do deficit hídrico e após a reidratação das plantas

Na Figura 5 está apresentada a análise de componentes principais aos 25 dias após a imposição do deficit hídrico. Na análise, é possível observar a discriminação dos genótipos quanto ao tratamento hídrico. Os genótipos irrigados (I) se diferenciaram dos genótipos não irrigados (NI) por apresentarem maiores valores das características DVX, CHR, IV, AX, AF, gs e MPa. Já os genótipos não irrigados, apresentaram maior correlação com as características de AsA, EUA, CUT, CAT e APX. Observou-se correlação negativa entre as características gs, e MPa com AsA, MDA e EUA, bem como entre as características FVX com AX, FL, IV e AF (FIGURA 5).

Figura 5 - Projeção de vetores e dispersão de genótipos de *Coffea arabica* L. aos 25 dias após a imposição dos tratamentos hídricos, em relação aos dois primeiros componentes principais.



Variável morfológica: área foliar (AF). Variáveis fisiológicas: eficiência instantânea no uso da água (EUA), condutância estomática (gs), e potencial hídrico na antemanhã (MPa). Variáveis bioquímicas: peróxido de hidrogênio (H₂O₂), malondialdeído (MDA), catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD), ascorbato peroxidase (APX) e ascorbato (AsA). Variáveis anatômicas foliares: limbo foliar (LIM), cutícula da face adaxial (CUT), densidade estomática (DEN), relação entre diâmetro polar e equatorial (DPDE), área do floema (FL), área do xilema (AX), diâmetro dos vasos do xilema (DVX), frequência de vasos do xilema (FVX), índice de vulnerabilidade (IV) e condutividade hidráulica relativa (CHR).

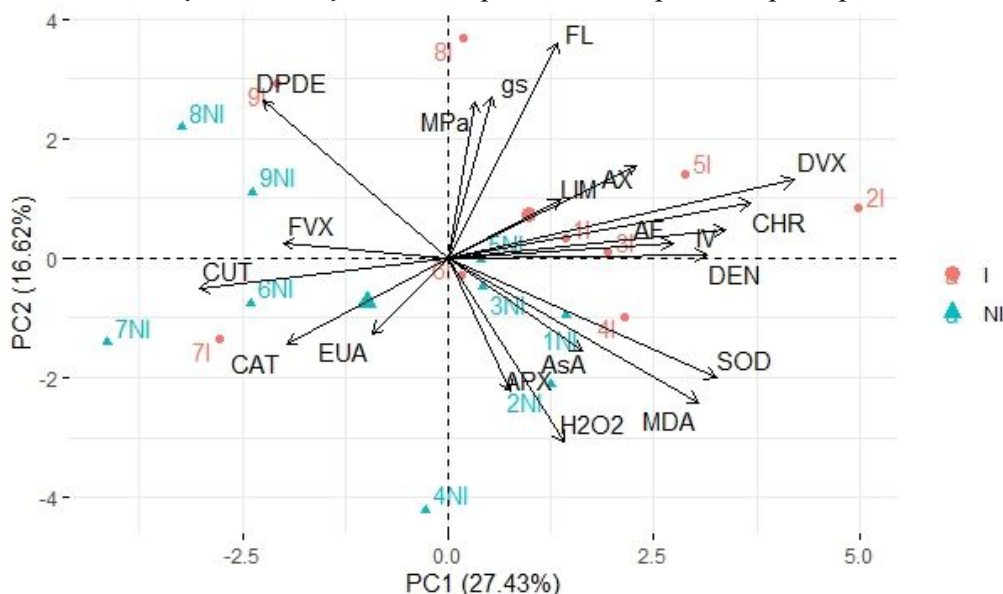
Fonte: Da autora (2021).

As plantas do genótipo 8NI se diferenciaram dos demais por apresentar maiores valores médios de CUT, DPDE e EUA. Valores intermediários da atividade da APX e de DPDE, distinguiram as plantas do genótipo 6NI dos demais. Assim como verificou-se valores intermediários da atividade da CAT e APX no genótipo 7NI. Maior atividade destas enzimas foram verificadas nas plantas do genótipo 9NI sob restrição hídrica (FIGURA 5).

As plantas do genótipo 4NI se diferenciaram por apresentarem valores médios intermediários da atividade da enzima CAT. Maior valor médio de AsA associados a baixos valores de gs e Mpa, distinguiu as plantas do genótipo 1NI dos demais. Já as plantas do genótipo 3NI destacaram-se por apresentar maior espessura da CUT, EUA e níveis intermediários de AsA e MDA (FIGURA 5).

Na Figura 6 está apresentada a dispersão dos genótipos aos 17 dias após a reidratação. De maneira geral, os genótipos submetidos ao déficit hídrico após a reidratação apresentaram comportamento próximo ao controle irrigado, verificado pela dispersão gráfica. Algumas características, assim como aos 25 DAIDH foram predominantes nos genótipos irrigados, tais como a Mpa, gs, FL, LIM, AX, DVX, CHR e IV (FIGURA 6).

Figura 6 - Projeção de vetores e dispersão de genótipos de *Coffea arabica* L. aos 17 dias após a reidratação, em relação aos dois primeiros componentes principais.



Variável morfológica: área foliar (AF). Variáveis fisiológicas: eficiência instantânea no uso da água (EUA), condutância estomática (gs), e potencial hídrico na antemanhã (MPa). Variáveis bioquímicas: peróxido de hidrogênio (H₂O₂), malondialdeído (MDA), catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD), ascorbato peroxidase (APX) e ascorbato (AsA). Variáveis anatômicas foliares: limbo foliar (LIM), cutícula da face adaxial (CUT), densidade estomática (DEN), relação entre diâmetro polar e equatorial (DPDE), área do floema (FL), área do xilema (AX), diâmetro dos vasos do xilema (DVX), frequência de vasos do xilema (FVX), índice de vulnerabilidade (IV) e condutividade hidráulica relativa (CHR).

Fonte: Da autora (2021).

Após a reidratação, as características que distinguiram as plantas do genótipo 7NI dos demais foram a espessura da CUT, atividade da enzima CAT e a EUA. Já as plantas do genótipo 6NI se diferenciaram pela espessura da CUT (FIGURA 6).

A maior DPDE contribuiu para a dispersão do genótipo 8NI, já no genótipo 2NI o conteúdo de AsA o diferenciou dos demais genótipos avaliados. Quanto ao genótipo 9NI, após a reidratação, as características morfoanatômicas como a maior FVX associado a menores IV, AF e DEN contribuíram para sua dispersão (FIGURA 6).

4 DISCUSSÃO

O deficit hídrico é considerado o principal estresse abiótico e prejudica o crescimento, desenvolvimento e a produtividade das culturas (DAMATTA; RAMALHO, 2006; KAPOOR *et al.*, 2020). As respostas dos genótipos à seca são controladas por diversos mecanismos (NALINA *et al.*, 2021). Para verificar os mecanismos relacionados à tolerância ao deficit hídrico em genótipos de *Coffea arabica* L., o presente estudo avaliou características fisiológicas, bioquímicas e anatômicas foliares.

O desempenho fotossintético tem sido relacionado à produtividade das culturas (TONIUTTI *et al.*, 2019). No presente trabalho, em condições de disponibilidade hídrica, as plantas dos genótipos 1, 3 e 8 apresentaram maior taxa fotossintética em relação aos demais (FIGURA 2 A). Sendo que nas plantas do genótipo 1 foram verificados maiores valores médios de condutância e transpiração estomática, o que fez com que esse genótipo apresentasse menor eficiência instantânea no uso da água. A transpiração maior nesse genótipo possivelmente pode ser devido ao fato deste estar dentre os genótipos de maior área foliar (TABELA 2; FIGURAS 2 A, D; 3 A, D; 4 A).

Sob limitação hídrica, o fechamento estomático é uma das primeiras respostas a fim de evitar a transpiração excessiva. No entanto, esse mecanismo restringe o influxo de CO₂ e prejudica a fotossíntese (BLANKENAGEL *et al.*, 2018; TORRE *et al.*, 2021). Por outro lado, a capacidade de manter a taxa fotossintética mesmo em condições de baixa disponibilidade hídrica, tem sido associada às plantas com maior eficiência do uso da água (BACCARI *et al.*, 2020; TURNER, 1986).

Aos 25 DAIDH, a temperatura máxima registrada foi de 46 °C e a umidade relativa mínima foi de 20% (FIGURA 1), condições que aliadas ao estresse hídrico certamente afetaram os genótipos avaliados, que apresentaram comportamentos distintos. Verificou-se maior eficiência instantânea no uso da água na maioria dos genótipos submetidos ao deficit hídrico

(FIGURA 4 B). No entanto, essa característica deve ser acompanhada pela manutenção da fotossíntese, ao mesmo tempo do controle da transpiração (FERREIRA; GONÇALVES; FERRAZ, 2012).

A manutenção da taxa fotossintética líquida associada a um baixo potencial hídrico na antemanhã e transpiração, foi observada nas plantas dos genótipos 2, 3 e 8 (FIGURAS 2B e 3E), que também permaneceram dentro o grupo com maior EUA no período de estresse (FIGURA 4 B). Já as plantas dos genótipos 5 e 7 destacaram-se com maiores valores médios de potencial hídrico associado à baixa taxa transpiratória e alta taxa fotossintética sob deficit hídrico.

Por outro lado, a conservação da condutância e transpiração estomática sob restrição hídrica moderada, é uma característica desejável. Já que está intimamente associada as condições necessárias para a produtividade das culturas, tais como a fixação de CO₂ e a absorção de água (BLUM, 2009; TIME; ACEVEDO, 2021). Nesse sentido, destacaram-se as plantas do genótipo 9 sob baixo potencial hídrico na antemanhã, que se apresentou com maiores valores médios de condutância estomática e transpiração, em relação aos demais genótipos avaliados. Já as plantas dos genótipos 2, 3, 4 e 6 permaneceram no segundo grupo com maiores valores médios de transpiração (FIGURA 2E e 3B). Além disso, as plantas dos genótipos 4 e 6 permaneceram dentre os genótipos com maiores valores médios de potencial hídrico de antemanhã.

A capacidade de recuperação é tão importante quanto a tolerância ao deficit hídrico (HASSAN *et al.*, 2021). A recuperação do potencial hídrico na antemanhã foi observada em todos os genótipos avaliados e da fotossíntese na maioria dos genótipos avaliados (FIGURAS 2C e 3F). Assim como os genótipos que foram submetidos ao deficit hídrico apresentaram maior EUA (FIGURA 4 C). Destacaram-se as plantas do genótipo 3 com maiores valores médios de condutância estomática, fotossíntese e eficiência do uso da água superiores ao controle irrigado (FIGURAS 2C, 3F 4C). Em contraste, a fotossíntese das plantas do genótipo 4 ainda apresentaram valores médios inferiores ao controle irrigado. O estresse hídrico induzido pode ter afetado mecanismos bioquímicos e fotoquímicos desse genótipo (HASSAN *et al.*, 2021).

Plantas que passaram por um período de estresse hídrico, podem otimizar o uso de carbono interno, assim reduzem a condutância e transpiração estomática (GALMÉS; MEDRANO; FLEXAS, 2007). Tal qual o comportamento observado nas plantas dos genótipos 4, 5, 8 e 9, que mesmo após a reidratação, ainda apresentaram valores inferiores de condutância estomática e transpiração em relação ao controle irrigado (FIGURAS 2C e F, 3C e F).

O estresse hídrico leva a um desequilíbrio entre a absorção de luz e sua utilização, devido ao fechamento estomático. O excesso de energia luminosa afeta a cadeia de transporte de elétrons, levando à superprodução de espécies reativas de oxigênio (EROs), formando radical superóxido, peróxido de hidrogênio e radicais de hidroxila (BARBOSA *et al.*, 2014; HASANUZZAMAN *et al.*, 2020). Em condições normais há uma estabilidade entre geração e eliminação de EROs que, sob baixas ou moderadas concentrações, tem a função mediar a transdução de sinal que auxilia nas respostas das plantas a estímulos bióticos e abióticos (DVORAK *et al.*, 2021; GARCÍA-CAPARRÓS *et al.*, 2020).

Sob déficit hídrico, a superprodução de EROs leva a lesões celulares pela oxidação de proteínas, peroxidação de lipídios e danos ao DNA e até mesmo morte da planta (AZAD *et al.*, 2021; GARCÍA-CAPARRÓS *et al.*, 2020). O peróxido de hidrogênio e o malondialdeído (MDA) são utilizados como marcadores em estudos relacionados ao estresse oxidativo causado pela deficiência hídrica (HASANUZZAMAN *et al.*, 2020). Neste trabalho, não foram observadas diferenças significativas para o tratamento hídrico e para a interação entre G x TH, quanto ao peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e o MDA. No entanto, verificou-se variabilidade para essas características em relação aos genótipos avaliados. Sendo que as plantas do genótipo 6 apresentaram menores valores médios dessas características nas 3 avaliações em relação aos demais. Aos 25 DAIDH, observou-se menores níveis de H₂O₂ nas plantas dos genótipos 6, 8 e 9. Além disso, nas plantas dos genótipos 6 e 4 verificou-se menores níveis de MDA em relação aos demais (TABELA 2).

Para reduzir os danos causados devido a geração de EROs, ocorre a indução do sistema de defesa antioxidante, que inclui a atividade de enzimas antioxidantes e antioxidantes não enzimáticos (NALINA *et al.*, 2021). A enzima superóxido dismutase (SOD) é a primeira linha de defesa contra os efeitos nocivos de EROs, catalisa o radical superóxido em H₂O₂ e O₂ (SHARMA *et al.*, 2012). Observou-se aos 25 DAIDH aumento da atividade da SOD nas plantas do genótipo 1 e redução nas plantas dos genótipos 3 e 7 em relação ao controle irrigado (TABELA 3). O aumento da atividade da SOD no genótipo 1 indica a indução de mecanismo de fotoproteção, a fim de eliminar as EROs e minimizar o estresse sofrido (HASSAN *et al.*, 2021).

As enzimas CAT e APX tem função de neutralizar o H₂O₂ nas células vegetais (SHARMA *et al.*, 2012). Durante o estresse hídrico, aos 25 DAIDH, observou-se aumento da atividade da enzima CAT nos genótipos não irrigados em relação ao controle irrigado (TABELA 3). Esse resultado corrobora com outros autores que verificaram níveis elevados de CAT em plantas submetidas ao déficit hídrico (ABBOUD *et al.*, 2021; NALINA *et al.*, 2021).

A atividade da CAT foi maior nas plantas do genótipo 9 sob condições de déficit hídrico, em relação aos demais genótipos avaliados. No segundo grupo permaneceram as plantas dos genótipos 4 e 7, de acordo com o agrupamento do teste Scott-Knott (TABELA 3). Concomitante, o genótipo 9 apresentou menores níveis de H_2O_2 , possivelmente pela atividade dessa enzima. Em contrapartida, as plantas dos genótipos 1 e 5, sob déficit hídrico, apresentaram menor atividade da CAT e maiores níveis de H_2O_2 (TABELAS 2 e 3).

A enzima peroxidase do ascorbato (APX), faz parte do ciclo ascorbato-glutationa, um mecanismo antioxidante e tem alta afinidade com H_2O_2 . Neste ciclo, uma molécula de ascorbato é utilizada para reduzir H_2O_2 à água (SHARMA *et al.*, 2012). No presente trabalho, verificou-se maior atividade da APX nos genótipos não irrigados, no entanto, não foi verificada interação significativa entre G x TH. Observou-se maior atividade dessa enzima nas plantas dos genótipos 3, 7, 8 e 9 (TABELA 5). O incremento na atividade da APX é um dos mecanismos que foi observado por outros estudos em genótipos tolerantes à seca (NALINA *et al.*, 2021).

O ascorbato (AsA) é um dos principais antioxidantes não enzimáticos e tem um papel importante na eliminação de EROs, devido sua capacidade de doar elétrons em reações enzimáticas e não enzimáticas (HASANUZZAMAN *et al.*, 2020; SHARMA *et al.*, 2012). Aos 25 DAIDH, houve incremento nos níveis de AsA na maioria dos genótipos não irrigados. Os maiores níveis de AsA foram observados nas plantas dos genótipos 1, 2 e 8 e, em contrapartida, no genótipo 7NI observou-se redução no conteúdo de AsA em relação ao controle irrigado (TABELA 5).

Ao analisar a recuperação dos genótipos após a reidratação, verificou-se que o retorno da irrigação levou à redução dos níveis de CAT, SOD, APX e AsA em relação ao período de estresse, além disso, os valores médios foram próximos ao período inicial do presente estudo (TABELAS 3 e 5). No entanto, observou-se maiores níveis de MDA em relação as avaliações anteriores (TABELA 2), possivelmente por danos causados às membranas celulares devido ao estresse hídrico (HASSAN *et al.*, 2021). A atividade das enzimas CAT e APX também foram maiores nos genótipos submetidos ao déficit hídrico em relação ao controle irrigado (TABELAS 4 e 6).

O estresse imposto causou mudanças nos genótipos avaliados, tanto nos aspectos fisiológicos e bioquímicos, mas também houve adaptações estruturais na folha. Essas são formas de evitar a transpiração e sobreviver ao estresse (HASANAGIC *et al.*, 2020). A condutância e a permeabilidade cuticular podem desempenhar um grande papel na forma que a vegetação responde à seca (LANNING; WANG; NOVICK 2020). Embora a transpiração cuticular represente cerca de 5 a 10% na taxa transpiratória (FERRI; LAMBERTI, 1960), a

transpiração não estomática nesse caso, não é benéfica, pois não há fixação de CO₂ (BLUM, 2009). Dessa forma, uma camada mais espessa da cutícula pode beneficiar plantas que passam por período de déficit hídrico (ONODA *et al.*, 2012; KANE *et al.*, 2020). Neste estudo, verificou-se aumento dessa camada nos genótipos não irrigados. Destacaram-se as plantas dos genótipos 3, 6, 7, 8 e 9, que apresentaram maior espessura da cutícula, quando não irrigados (TABELA 7). Além disso, essa característica pode ter favorecido a manutenção de maiores valores de potencial hídrico de antemanhã e taxa fotossintética durante a fase de estresse nas plantas dos genótipos 6 e 7 (FIGURAS 2B e 3E). Resultados similares foram observados em outros estudos que verificaram menor potencial hídrico em genótipos de café com maior espessura da cutícula (BATISTA *et al.*, 2010; GRISI *et al.*, 2008; TARATIMA *et al.*, 2020).

Sob condições climáticas adversas como radiação, temperatura elevada e estresse hídrico, geralmente há um aumento na espessura do limbo foliar. Isso ocorre devido ao desenvolvimento dos tecidos de parênquimas paliçádico e esponjoso, que podem favorecer o armazenamento e fixação de CO₂ e possibilitar a sobrevivência de plantas sob estresse hídrico (ALDEROTTI *et al.*, 2020; BALIZA *et al.*, 2012; BATISTA *et al.* 2010; CASTANHEIRA *et al.*, 2016). No entanto, no presente trabalho, não se observou aumento na espessura do limbo foliar dos genótipos não irrigados em relação ao controle irrigado (TABELA 7). Dentre os genótipos não irrigados, maior espessura do limbo foliar foi observado nas plantas do genótipo 3, seguido por 1, 5, 6 e 9, de acordo com o agrupamento de Scott-Knott (TABELA 7). Por outro lado, houve redução na espessura do limbo foliar nas plantas dos genótipos 1 e 7, em relação ao controle irrigado (TABELA 7), provavelmente devido a redução de espaços intercelulares. Resultados semelhantes foram observados por Hasanagic *et al.* (2020) em plantas submetidas ao déficit hídrico.

A limitação hídrica também induz adaptações nos estômatos quanto à localização, a densidade e no seu formato (BALIZA *et al.*, 2012; BATISTA *et al.*, 2010; QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014). A redução da densidade estomática foi observada nas plantas dos genótipos 2, 4 e 5 em relação ao controle irrigado (TABELA 9). O menor número de estômatos por área pode reduzir a taxa transpiratória (NÓIA JÚNIOR *et al.*, 2018) e essa característica tem sido relacionada a genótipos tolerantes à seca (OLIVEIRA *et al.* 2018). Além disso, verificou-se incremento da relação entre diâmetro polar e equatorial dos estômatos nas plantas dos genótipos 2, 5, 6 e 7 em relação ao controle irrigado (TABELA 9). Isto indica formato elipsoide do estômato, o que reduz a transpiração por menor abertura estomática, otimizando as trocas gasosas sob restrição hídrica (BATISTA *et al.*, 2010; GRISI *et al.*, 2008; NÓIA JÚNIOR *et al.*, 2018).

As adaptações à deficiência hídrica também são observadas nos tecidos vasculares que apresentam diferentes respostas em função desse estresse (HASANAGIC *et al.*, 2020; QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014). No presente trabalho, observou-se redução na área do xilema e floema nas plantas dos genótipos 2, 4 e 6, em relação ao controle irrigado. Em contraste, o genótipo 1 foi o único que apresentou aumento da área do floema, em relação ao controle irrigado. Dentre os genótipos não irrigados, as plantas do genótipo 5 permaneceram no grupo de maior área do xilema e floema (TABELA 10). Maiores áreas no sistema vascular podem favorecer o transporte de água, sais minerais e fotoassimilados, otimizando a fotossíntese, o crescimento e o desenvolvimento da planta (QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014). Entretanto, neste estudo, nas plantas do genótipo 1 não foi verificada manutenção da fotossíntese aos 25 DAIDH.

A limitação hídrica reduz a divisão celular e, por consequência, há menor expansão da área foliar (BANGAR *et al.*, 2019). As propriedades hidráulicas dos vasos do xilema parecem estar relacionadas ao tamanho da folha, sendo que folhas menores apresentaram menor diâmetro dos vasos do xilema (MAURI *et al.*, 2020). Resultados semelhantes foram observados neste trabalho, onde as plantas dos genótipos 4, 6, 7 e 8, os quais permaneceram no grupo de menor área foliar, com exceção do genótipo 6 (TABELA 2) apresentaram menor diâmetro dos vasos do xilema sob deficit hídrico. Além disso, esses genótipos tiveram menor índice de vulnerabilidade dos vasos do xilema, quando não irrigados (TABELA 10). Vasos do xilema com essas características podem suportar tensões maiores, evitar a embolia e a cavitação, mantendo a função hidráulica da folha em períodos secos (OLIVEIRA *et al.*, 2018; YAO *et al.*, 2020).

Em condições de restrição hídrica, o fechamento estomático reduz a capacidade de transporte de água das folhas e limita na condutância hidráulica nos vasos do xilema (TARATIMA *et al.*, 2020; TORRE *et al.*, 2021). Esse comportamento foi verificado na maioria dos genótipos avaliados submetidos ao deficit hídrico, que apresentaram redução na condutividade hidráulica relativa dos vasos do xilema (CHR). Sendo que as plantas dos genótipos 1, 7 e 8 foram os mais afetados pelo de deficit hídrico (TABELA 9), o que pode ter prejudicado a fotossíntese das plantas do genótipo 1 (FIGURA 2B). Em contrapartida, destacaram-se as plantas dos genótipos 3, 6 e 9 que mantiveram a CHR semelhantes ao controle irrigado, o que pode ter favorecido o transporte de água e sais minerais durante o período de estresse.

Na análise de componentes principais foi possível observar distinção entre os genótipos quanto ao tratamento hídrico aos 25 DAIDH (FIGURA 5). No tratamento irrigado, observou-

se que as trocas gasosas foram beneficiadas pela disponibilidade hídrica, bem como maiores valores médios de potencial hídrico de manhã (FIGURAS 2, 3 e 4). A condutividade e o diâmetro dos vasos do xilema foram maiores nesse tratamento, assim como o índice de vulnerabilidade dos vasos do xilema (TABELA 9), uma vez é calculado pela razão entre diâmetro e frequência de vasos (CARLQUIST, 1988).

No tratamento não irrigado, observou-se adaptações nos genótipos devido ao estresse provocado. Nas plantas dos genótipos de maior área foliar 1 e 2 (TABELA 2) verificou-se aumento do conteúdo de ácido ascórbico (AsA) em resposta ao baixo potencial hídrico de antemanhã e condutância estomática. No entanto, as plantas do genótipo 2, mesmo sob baixo potencial hídrico, mantiveram a taxa fotossintética semelhante ao controle irrigado, durante a fase de estresse (FIGURA 2 B). Após a reidratação, o conteúdo de AsA diferenciou o genótipo 2NI dos demais (FIGURA 6).

Nas plantas do genótipo 3, em resposta do estresse hídrico houve aumento dos níveis de malondialdeído, na espessura da cutícula da face adaxial, eficiência instantânea no uso da água, assim como níveis intermediários de ácido ascórbico (FIGURAS 2 E, 3 E, 5; TABELA 3).

A tolerância à seca do genótipo 9 (cultivar IPR100), relatada por outros autores (CARVALHO *et al* 2017) parece ser governada por uma série de mecanismos fisiológicos, estruturais e bioquímicos, que combinados conferem tolerância à seca, conforme observado no presente trabalho. As principais características observadas neste trabalho foram aumento da espessura da cutícula da face adaxial, da frequência de vasos do xilema, bem como da atividade das enzimas CAT e APX associados a baixos valores de H_2O_2 e de IV, conforme verificados na análise de componentes tanto aos 25 DAIDH como após a reidratação (TABELAS 2, 3, 5 e 9; FIGURAS 5 e 6). Essas características podem ter favorecido a manutenção das trocas gasosas e mesmo sob baixo potencial hídrico de antemanhã durante o estresse hídrico (FIGURAS 2 B e E; 3 B).

As plantas dos genótipos 6 e 8 apresentaram maior espessura da cutícula associados a baixos valores de H_2O_2 e de IV (TABELAS 2 e 9). No entanto, o genótipo 6 destacou-se em relação aos demais por ser o único genótipo a manter o potencial hídrico na antemanhã semelhante ao controle irrigado, aos 25 DAIDH (FIGURA 3E). Além disso, permaneceu dentre os genótipos com maior atividade da SOD associados a baixos valores de H_2O_2 e de IV (TABELAS 2, 3 e 9).

As plantas do genótipo 7 permaneceram dentre os genótipos com maior atividade das enzimas APX, CAT (TABELAS 3, 5), maior espessura da CUT associado a baixo IV

(TABELAS 7 e 9; FIGURA 5). Estas características podem ser intrínsecas desse genótipo, uma vez que também foram predominantes após a reidratação (FIGURA 6).

Os resultados demonstraram que, de maneira geral, os genótipos apresentaram adaptações ao estresse hídrico. Destacaram-se os genótipos que tiveram adaptações que evitaram a transpiração excessiva, como aumento da espessura da cutícula e maior relação DPDE. Além de manutenção da condutividade hidráulica e indução do sistema antioxidante. Essas informações podem auxiliar programas de melhoramento genético do cafeeiro na seleção de genótipos com potencial para a tolerância à seca.

Os principais mecanismos de adaptação na fase de deficit hídrico foram manutenção de trocas gasosas sob baixo potencial hídrico na antemanhã (genótipos 2 e 9); manutenção do potencial hídrico de antemanhã (genótipo 6); baixos níveis de peróxido de hidrogênio (genótipos 6, 8 e 9); maior atividade das enzimas catalase e ascorbato peroxidase (genótipo 9); maiores níveis de ascorbato (genótipos 1, 2 e 8); aumento na espessura da cutícula da face adaxial (genótipos 3, 6, 7, 8 e 9); menor índice de vulnerabilidade associado a menor diâmetro dos vasos do xilema (genótipos 4, 6, 7 e 8); manutenção da condutividade hidráulica relativa dos vasos (genótipos 2, 3, 6 e 9) e; aumento na relação entre diâmetro polar e equatorial dos estômatos (genótipos 2, 5, 6 e 7).

5 CONCLUSÃO

Os genótipos de *Coffea arabica* L. apresentaram variabilidade quanto as respostas nas características fisiológicas, bioquímicas e anatômicas foliares, indicando diferentes estratégias de adaptação ao deficit hídrico.

Destacaram-se entre os genótipos avaliados os Híbridos de Timor UFV 377-21, UFV 376-31 e a cultivar IPR100, apresentando adaptações que permitiram a manutenção do *status* hídrico em fase de desenvolvimento inicial. Sendo que as principais estratégias de adaptação foram a manutenção de trocas gasosas, potencial hídrico na antemanhã, indução do sistema antioxidante e manutenção da condutividade hidráulica.

REFERÊNCIAS

- ABBOUD, S. *et al.* Antioxidant status, biochemical and hormonal responses involved in the response of *Olea europaea* L. to water deficit induced by PRD irrigation. **Scientia Horticulture**, [s.l.], v. 276, p. 1-38, 2020.
- ALDEROTTI, F. *et al.* Coordination of morpho-physiological and metabolic traits of *Cistus incanus* L. to overcome heatwave-associated summer drought: a two-year on-site field study. **Frontiers in Ecology and Evolution**, [s.l.], v. 8, n. 576296, p. 1-17, 2020.
- ALVARES, C.A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s.l.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ARAKAWA, N. *et al.* A rapid and sensitive method for the determination of ascorbic acid using 4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline. **Agricultural and Biological Chemistry**, [s.l.], v. 45, n. 5, p. 1289-1290, 1981.
- AZAD, N. *et al.* Physiological mechanism of salicylic acid in *Mentha pulegium* L. under salinity and drought stress. **Brazilian Journal of Botany**, [s.l.], v. 44, n. 2, p. 1-11, 2021.
- BACCARI, S. *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**, [s.l.], v. 11, n. 614144, p. 1-14, 2020.
- BALIZA, D.P. *et al.* Trocas gasosas e características estruturais adaptativas de cafeeiros cultivados em diferentes níveis de radiação. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 3, p. 250-258, 2012.
- BANGAR, P. *et al.* Morphophysiological and biochemical response of mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] varieties at different developmental stages under drought stress. **Turkish Journal Biology**, [s.l.], v. 43, n. 1, p. 58-69, 2019.
- BARBOSA, M.R. *et al.* Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 44, n. 3, p. 453-460, 2014.
- BARROS, R.S. *et al.* Determinação da área foliar em café (*Coffea arabica* L. cv. 'Bourbon Amarelo'). **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 20, n. 107, p. 44-52, 1973.
- BATISTA, L.A. *et al.* Anatomia foliar e potencial hídrico na tolerância de cultivares de café ao estresse hídrico. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 3, p. 475-481, 2010.
- BETTENCOURT, A.J.; RODRIGUES JR., C.J. Principles and practice of coffee breeding for resistance to rust and other diseases. In: CLARCKE, R.J.; MACREA, R. (Eds.). **Coffee**. London: Elsevier Applied Science, 1988. v. 4. p. 199-235..
- BIEMELT, S.; KEETMAN, U.; ALBRECHT, G. Re-aeration following hypoxia or anoxia leads to activation of the antioxidative defense system in roots of wheat seedlings. **Plant Physiology**, Rockville, v. 116, n. 2, p. 651-658, 1998.

- BLANKENAGEL, S. *et al.* Generating plants with improved water use efficiency. **Agronomy**, [s.l.], v.8, n. 194, p. 1-13, 2018.
- BLUM, A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. **Field Crops Research**, [s.l.], v. 112, p. 119-123, 2009.
- BRUM, C.N. *et al.* Modifications in the metabolism of carbohydrates in (*Coffea arabica* L. cv. Siriema) seedlings under drought conditions. **Coffee Science**, [s.l.], v. 8, n. 2, p. 140-147, 2013.
- BUEGE, J.A., AUST, S.D. Microsomal lipid peroxidation methods. **Enzymology**, San Diego, v. 52, p. 302-310, 1978.
- CANALES, F.J. *et al.* Drought resistance in oat involves ABA-mediated modulation of transpiration and root hydraulic conductivity. **Environmental and Experimental Botany**, [s.l.], v. 182, n. 104333, p. 1-14, 2021.
- CARLQUIST, S. **Comparative Wood Anatomy**. Berlin: New York, Springer, 1988. p. 436.
- CARVALHO, A. *et al.* Aspectos genéticos do cafeeiro. **Revista Brasileira de Genética**, [s.l.], v. 14, p. 135-183, 1991.
- CARVALHO, F.G. *et al.* Tolerância ao déficit hídrico em mudas de genótipos de café portadores de genes de diferentes espécies. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 156-163, 2017.
- CASTANHEIRA, D.T. *et al.* Potencial de utilização de características anatômicas e fisiológicas na seleção de progênies de cafeeiro. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 3, p. 375-386, 2016.
- CLARINDO, W.R. *et al.* Following the track of “Híbrido de Timor” origin by cytogenetic and flow cytometry approaches. **Genet Resour Crop Evol**, [s.l.], v. 60, p. 2253-2259, 2013.
- CRUZ, C.D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum**, [s.l.], v. 35, n. 3, p. 271-276, 2013.
- DAMATTA, F.M.; RAMALHO, J.D.C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal Plant Physiology**, Campos dos Goytacases, v. 18, n. 1, p. 55-81, 2006.
- DAVIS, A.P. *et al.* The impact of climate change on indigenous arabica coffee (*Coffea arabica*): predicting future trends and identifying priorities. **Plos One**, [s.l.], v. 7, n. 11, p.1-13, 2012.
- DUBBERSTEIN, D. *et al.* Resilient and sensitive key points of the photosynthetic machinery of *Coffea* spp. to the single and superimposed exposure to severe drought and heat stresses. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 11, n. 1049, p. 1-22, 2020.

DVORAK, P. *et al.* Signaling toward reactive oxygen species-scavenging enzymes in plants. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 11, n. 618835, p. 1-24, 2021.

FAHN, A. *et al.* **Wood anatomy and identification of trees and shrubs from Israel and adjacent regions**. Isr. Acad. Sci. Hum. Jerusalem, Isr. 1040, 1986.

FERRI, M.G.; LAMBERTI, A. Informações sobre a economia d'agua de plantas de um tabuleiro no município de Goiana (Pernambuco). **Botânica**, São Paulo, n. 17, p. 133-145, 1960.

FREIRE, L.P. *et al.* Análise da expressão do gene manose 6 fosfato redutase em cafeeiros submetidos ao déficit hídrico. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 17-23, 2013.

GALMÉS, J.; MEDRANO, H.; FLEXAS J. Photosynthetic limitations in response to water stress and recovery in Mediterranean plants with different growth forms. **New Phytologist**, [s.l.], v. 175, n.1, p. 81-93, 2007.

GARCÍA-CAPARRÓS, P. *et al.* Oxidative stress and antioxidante metabolism under adverse environmental conditions: a review. **The Botanical Review**, [s.l.], [s.v.], [s.n.], p. 1-46, 2020.

GIANNOPOLITIS, C.N., RIES, S.K. Superoxide dismutases: I. occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, [s.l.], v. 59, n .2, p. 309-314, 1977.

GRISI, F.A. *et al.* Avaliações anatômicas foliares em mudas de café ‘Catuai’ e ‘Siriema’ submetidas ao estresse hídrico. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 6, p. 1730-1736, 2008.

GUIMARÃES, P.T.G. *et al.* Cafeeiro. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ VENEGAS, V.H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. 360 p.

HASANAGIC, D. *et al.* Long term drought effects on tomato leaves: anatomical, gas exchange and antioxidant modifications. **Acta Physiologiae Plantarum**, [s.l.], v. 42, n. 121, p. 1-14, 2020.

HASANUZZAMAN, M. *et al.* Regulation of ROS metabolism in plants under environmental stress: A review of recent experimental evidence. **Internacional Journal of Molecular Sciences**, [s.l.], v. 21, n. 8695, p. 1-42, 2020.

HASSAN, M.A.E. *et al.* Variability in drought response among the plus tree accessions of *Tectona grandis* (Linn f.) from the provenances of Kerala, South India. **Acta Physiologiae Plantarum**, [s.l.], v. 43, n.47, p. 1-12, 2021.

JOHANSEN, D.A. **Plant microtechnique**. New York: McGraw-Hill, 1940.

KANE, C.N. *et al.* A permeable cuticle, not open stomata, is the primary source of water loss from expanding leaves. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 11, n. 774, p. 1-9, 2020.

- KAPOOR, D. *et al.* The impact of drought in plant metabolism: how to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. **Applied Sciences**, [s.l.], v. 10, n. 5692, p. 1-19, 2020.
- LANNING, M.; WANG, L.; NOVICK, K. A. The importance of cuticular permeance in assessing plant water use strategies. **Tree Physiology**, [s.l.], v. 40, n. 4, p. 425-432, 2020.
- MAURI, R. *et al.* Leaf hydraulic properties are decoupled from leaf area across coffee species. **Tress**, [s.l.], v. 34, n. 6, p. 1507-1514, 2020.
- MOAT, J. *et al.* Resilience potencial of the Ethiopian coffee sector under climate change. **Nature Plants**, [s.l.], v. 3, n. 17081, p. 1-14, 2017.
- NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v. 22, n. 5, p. 867-880, 1981.
- NALINA, M. *et al.* Water déficit-induced oxidative stress and differential response in antioxidante enzymes of tolerant and susceptible tea cultivars under field condition. **Acta Physiologiae Plantarum**, [s.l.], v. 43, n. 10, p. 1-17, 2021.
- NÓIA JÚNIOR, R.D. *et al.* Ecophysiological acclimatization to cyclic water stress in Eucalyptus. **Journal of Forestry Research**, [s.l.], v. 31, n. 3, p. 797-806, 2020.
- O'BRIEN, T.P.; FEDER, N.; MCCULLY, M.E. Polychromatic staining of plant cell walls by toluidine blue O. **Protoplasma**, Karlsruhe, v. 59, n. 2, p. 368-373, 1964.
- OGASA, M. *et al.* Recovery performance in xylem hydraulic conductivity is correlated with cavitation resistance for temperature deciduous tree species. **Tree Physiology**, [s.l.], v. 33, n. 4, p. 335-344, 2013.
- OLIVEIRA, I. *et al.* Compared leaf anatomy and water relations of commercial and traditional *Prunus dulcis* (Mill.) cultivars under rain-fed conditions. **Scientia Horticulturae**, [s.l.], v. 229, p. 226-232, 2018.
- ONODA, Y. *et al.* The importance of leaf cuticle for carbon economy and mechanical strength. **New Phytologist**, [s.l.], v. 196, n. 2, p. 441-447, 2012.
- QUEIROZ-VOLTAN, R.B. *et al.* Caracterização da anatomia foliar de cafeeiros arábica em diferentes períodos sazonais. **Revista Biotemas**, Florianópolis, 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. 2019. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. Acesso em: 10 mar. 2021.
- RUIZ-CÁRDENAS, R. **A cafeicultura e sua relação com o clima**. Lavras: HRNS do Brasil, 2015. 23 p.
- SEGATTO, F.B. *et al.* Técnica para estudo da anatomia da epiderme foliar de batata. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 5, p. 1597-1601, 2004.

SHARMA, P. *et al.* Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of Botany**, [s.l.], v. 2012, n. 217037, p. 1-26, 2012.

SACHDEV, S. *et al.* Abiotic stress and reactive oxygen species: generation, signaling, and defense mechanisms. **Antioxidants**, [s.l.], v. 10, n. 277, p. 1-37, 2021.

SANTOS, H.G. dos *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

TARATIMA, W. *et al.* Effect of stress on the leaf anatomy of sugarcane cultivars with different drought tolerance. **Revista de Biologia Tropical**, [s.l.], v. 68, n. 4, p. 1159-1170, 2020.

TIME, A.; ACEVEDO, E. Effects of water deficits on *Propolis tamarugo* growth, water status and stomata functioning. **Plants**, [s.l.], v. 10, n. 53, p. 1-11, 2021.

TONIUTTI, L. *et al.* An altered circadian clock coupled with a higher photosynthesis efficiency could explain the better agronomic performance of a new coffee clone when compared with a standard variety. **International Journal of Molecular Sciences**, [s.l.], v. 20, n. 736, p. 1-19, 2019.

TORRE, F.D. *et al.* Leaf morphophysiological changes induced by long-term drought in *Jatropha curcas* plants explain the resilience to extreme drought. **Journal of Arid Environments**, [s.l.], v. 185, n. 104381, p. 1-8, 2021.

THIOUNE E-H. *et al.* Temperature impacts the response of *Coffea canephora* to decreasing soil water availability. **Tropical Plant Biology**, [s.l.], v. 13, p. 236-250, 2020.

TURNER, N.C. Crop water deficits: a decade of progress. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 19, p. 1-51, 1986.

UTHSCSA ImageTool. **Versão 3.0 final**. Disponível em: <http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/download.html>. Acesso em: 03 mar. 2021.

VELIKOVA, V.; YORDANOV, I.; EDREVA, A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous polyamines. **Plant Science**, Clare, v. 151, n. 1, p. 59-66, 2000.

YAO, G-Q. *et al.* Combined high leaf hydraulic safety and efficiency provides drought tolerance in *Caragana* species adapted to low mean annual precipitation. **New Phytologist**, [s.l.], v. 229, n. 1, p. 230-244, 2020.

ARTIGO 3 ASPECTOS PRODUTIVOS, QUALITATIVOS E ADAPTAÇÕES DE ACESSOS DE HÍBRIDO DE TIMOR AO PERÍODO SECO

RESUMO

Objetivou-se verificar aspectos produtivos, qualitativos e adaptações de acessos de Híbrido de Timor ao período seco. Foram utilizados 7 acessos de Híbrido de Timor do Banco Ativo de Germoplasma da EPAMIG, em Patrocínio-MG, além de duas cultivares, uma considerada tolerante (IPR 100), e outra sensível (Rubi MG1192) à deficiência hídrica. As características fisiológicas, bioquímicas e anatômicas foliares foram avaliadas em dois períodos sazonais (seco e chuvoso). Avaliou-se a condutância estomática e o potencial hídrico na antemanhã, considerando as avaliações fisiológicas. Em relação a bioquímica foram avaliados os níveis de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), malondialdeído (MDA), a atividade das enzimas catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD), ascorbato peroxidase (APX) e o conteúdo de ascorbato (AsA). As características anatômicas foliares avaliadas foram: espessura da cutícula da face adaxial (CUT), espessura do limbo foliar (LIM), densidade estomática (DEN), relação entre diâmetro polar e equatorial (DPDE), área do floema (AF); área (AX), diâmetro (DX) e frequência de vasos (FVX) do xilema, condutividade hidráulica relativa (CHR) e índice de vulnerabilidade (IV). Além disso, avaliou-se os atributos agrônômicos de produtividade e qualidade de bebida. Os resultados demonstraram que os acessos apresentaram diferentes adaptações ao período seco, sendo que alguns mantiveram valores mais altos de potencial hídrico na antemanhã, associados a maiores valores médios de condutância estomática. Verificou-se indução do sistema antioxidante com aumento da atividade da enzima SOD e do antioxidante não enzimático AsA em alguns genótipos durante o período seco. Quanto as características anatômicas foliares, as principais adaptações ao período seco foram o aumento da espessura da cutícula da face adaxial e do limbo foliar, bem como maior relação DPDE. A maioria dos acessos avaliados apresentaram bom desempenho produtivo e potencial para a qualidade de bebida. Concluiu-se que os acessos de Híbrido de Timor, assim como as cultivares IPR100 e Rubi MG1192, apresentaram variabilidade quanto as características fisiológicas, bioquímicas e anatômicas foliares, conferindo diferentes mecanismos de adaptação ao período seco. Destacaram-se os acessos Híbrido de Timor UFV 377-21 (genótipo 1), UFV 442-42 (genótipo 3), UFV 376-31 (genótipo 6) com adaptações ao período seco e potencial para a qualidade de bebida associado a maior produtividade.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L. Tolerância à seca. Produtividade. Qualidade de bebida.

ABSTRACT

The objective of this study was to verify productive and qualitative aspects, as well as adaptations of 'Híbrido de Timor' accessions to the dry period. Seven 'Híbrido de Timor' accessions from the Germplasm Bank of EPAMIG in Patrocínio-MG were used, as well as two cultivars, one considered tolerant (IPR 100) and another sensitive (Rubi MG1192) to water deficit. Leaf physiological, biochemical and anatomical characteristics were evaluated in two seasonal periods (dry and rainy). Stomatal conductance and predawn water potential were evaluated, considering the physiological evaluations. Regarding biochemical characteristics, the levels of hydrogen peroxide (H_2O_2) and malondialdehyde (MDA) were evaluated, besides the activity of catase (CAT), superoxide dismutase (SOD), ascorbate peroxidase (APX) and ascorbate content (AsA). The leaf anatomical characteristics evaluated were: adaxial cuticle

thickness (CUT), leaf blade thickness (LIM), stomatal density (DEN), relationship between polar and equatorial diameter (DPDE), phloem area (AF); area (AX), diameter (DX), vessel frequency (FVX) of the xylem, relative hydraulic conductivity (CHR) and vulnerability index (IV). In addition, the agronomic attributes yield and beverage quality were evaluated. The results revealed that the accessions showed different adaptations to the dry period, and some maintained higher values of predawn water potential associated with higher mean values of stomatal conductance. An induction of the antioxidant system with increased activity of SOD and the non-enzymatic antioxidant AsA in some genotypes during the dry period was observed. As for leaf anatomical characteristics, the main adaptations to the dry period were the increase in the thickness of the cuticle of the adaxial face and leaf blade, as well as a higher DPDE ratio. Most of the evaluated accessions showed good productive performance and beverage quality potential. It was concluded that ‘Híbrido de Timor’ accessions, as well as cultivars IPR100 and Rubi MG1192, showed variability in terms of physiological, biochemical and anatomical leaf characteristics, providing different adaptation mechanisms to the dry period. The highlights were ‘Híbrido de Timor UFV 377-21’ (genotype 1), ‘UFV 442-42’ (genotype 3), ‘UFV 376-31’ (genotype 6), with adaptations to the dry period and beverage quality potential, associated with higher yield.

Keywords: *Coffea arabica* L. Drought tolerance. Yield. Beverage quality.

1 INTRODUÇÃO

A seca é o estresse abiótico mais importante que afeta a produtividade das culturas (CANALES *et al.*, 2021). As projeções climáticas estimam para os próximos anos, alterações na distribuição de chuvas, com períodos tanto de excesso de chuva quanto períodos de seca prolongados (DUBBERSTEIN *et al.*, 2020; MOAT *et al.*, 2017).

No cafeeiro, inicialmente a restrição hídrica leva ao fechamento estomático como forma de evitar a transpiração excessiva. Este comportamento afeta a fotossíntese e, conseqüentemente, há redução na produção de fotoassimilados, reduzindo o crescimento e a produtividade da cultura (MARTINS *et al.*, 2019). Além disso, o déficit hídrico associado às temperaturas elevadas provoca queda e escaldadura nas folhas, afeta a fase reprodutiva e a granação de frutos (CAMARGO; CAMARGO, 2001; RUIZ-CÁRDENAS, 2015).

No entanto, as plantas são capazes de se adaptar a condições de estresses, o que permite sua sobrevivência (HASSAN *et al.*, 2021). Em plantas tolerantes à seca são observadas adaptações anatômicas foliares como aumento da espessura do limbo foliar, da cutícula, mudança na localização e formato dos estômatos, bem como de redução no diâmetro de vasos do xilema (CASTANHEIRA *et al.*, 2016; QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014). Além disso, as

plantas possuem enzimas e antioxidantes não enzimáticos que são capazes de neutralizar espécies reativas de oxigênio geradas pelo estresse hídrico (NALINA *et al.*, 2021).

O Banco Ativo de Germoplasma, no Campo Experimental da EPAMIG, localizado em Patrocínio-MG, possui aproximadamente 1500 acessos (CARVALHO *et al.*, 1991). Dentre estes, estão o germoplasma denominado Híbrido de Timor, que tem sido frequentemente utilizado em programas de melhoramento que visam resistência às doenças (CARVALHO *et al.* 1991; GUEDES *et al.*, 2013). No entanto, poucos estudos têm explorado esses acessos quanto à tolerância a estresses abióticos. Neste sentido, a seleção de genótipos com base em características fisiológicas, anatômicas e bioquímicas, e que ao mesmo tempo atendam a critérios de produtividade e qualidade de bebida, pode auxiliar programas de melhoramento genético do cafeeiro visando tolerância à seca. Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho, verificar aspectos produtivos, qualitativos e adaptações de acessos de Híbrido de Timor ao período seco.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material vegetal

Foram utilizados 7 acessos de Híbrido de Timor do Banco Ativo de Germoplasma (BAG) da EPAMIG em Patrocínio-MG, selecionados com base em parâmetros de produtividade, qualidade de bebida e resistência a doenças, além de duas cultivares consideradas como tolerante (IPR 100) (CARVALHO *et al.*, 2017), e a outra como sensível (Rubi MG1192) (FREIRE *et al.*, 2013) à deficiência hídrica (TABELA 1).

Tabela 1 - Identificação e genealogia de genótipos do Banco Ativo de Germoplasma da EPAMIG em Patrocínio-MG.

Acesso	Identificação no BAG-EPAMIG	Genealogia
1	MG 270 ¹	Híbrido Timor UFV 377-21
2	MG 270 ²	Híbrido Timor UFV 377-21
3	MG 364	Híbrido Timor UFV 442-42
4	MG 534	BE 5 Wush-Wush x Híbrido Timor UFV 366-08
5	MG 311	Híbrido Timor UFV 428-02
6	MG 279	Híbrido Timor UFV 376-31
7	MG 308	Híbrido de Timor UFV 427- 55
8	Rubi MG1192	Catuaí e Mundo Novo
9	IPR 100	“Catuaí” x cafeeiro (“Catuaí” x genótipo de café da série ‘BA-10’) portador de genes de <i>C. liberica</i> .

¹ MG 270 bloco 1; ² Seleção de plantas (1, 3 e 6) do acesso MG 270 no bloco 2.

Fonte: Da autora (2021).

O BAG foi instalado em 2005, no Campo Experimental da EPAMIG, localizado em Patrocínio-MG - região do Alto Paranaíba, situada a 18°59'26" de latitude Sul, 48°58'95" de longitude Oeste e altitude local de aproximadamente mil metros. O espaçamento adotado foi de 3.5 x 1.0 m nas entrelinhas e entre plantas, respectivamente. O solo é do tipo Latossolo Vermelho-amarelo e a topografia é plana, com ligeira inclinação (SANTOS *et al.*, 2013).

Os tratamentos culturais seguiram as recomendações técnicas usuais para a cultura do cafeeiro na região (adubação, manejo fitossanitário, desbrotas, controle mecânico e/ou manual das plantas daninhas).

2.1 Delineamento experimental

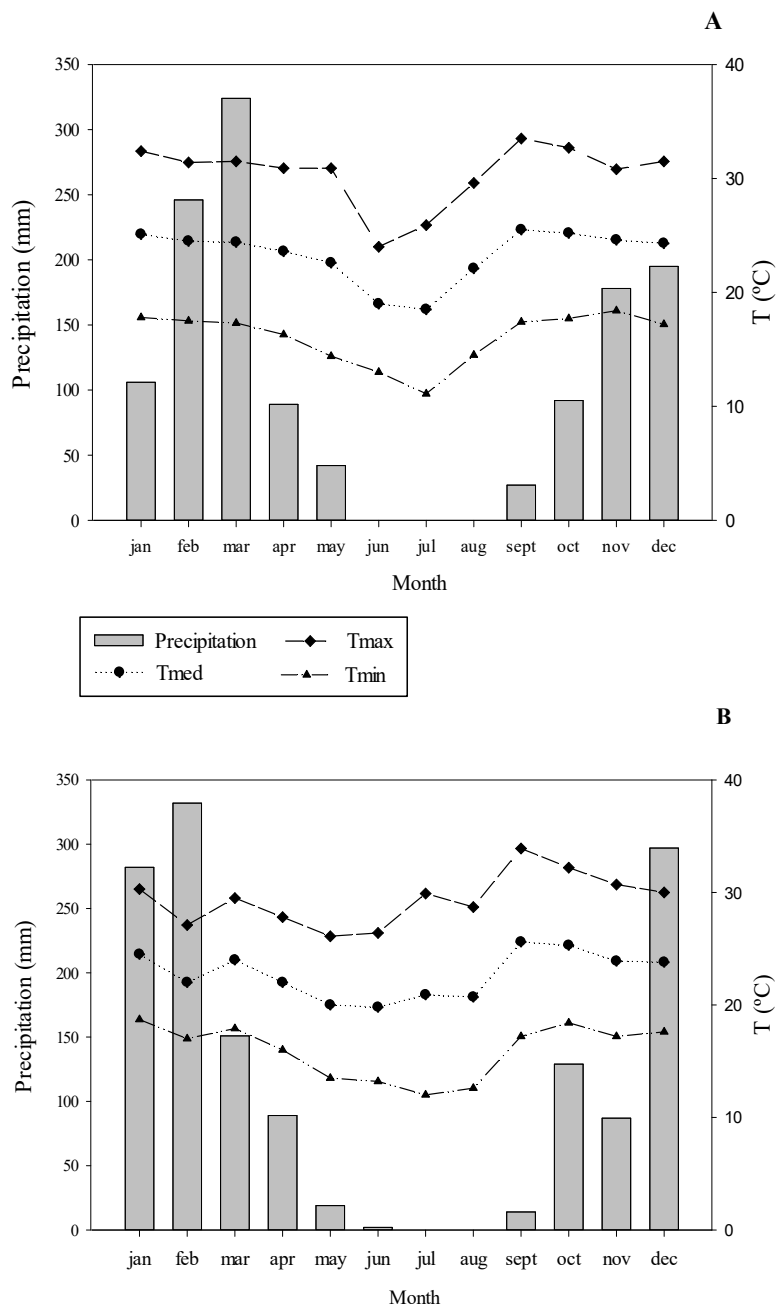
O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados e o ensaio foi constituído por 18 tratamentos, em esquema fatorial 9x2 (genótipos x período sazonal; G x P), com duas repetições. Para as análises fisiológicas, bioquímicas e anatômicas foliares foram consideradas três plantas centrais de cada parcela experimental avaliadas em dois períodos sazonais seco (agosto de 2019) e chuvoso (janeiro de 2020). Para produtividade e qualidade de bebida considerou-se a parcela experimental constituída por dez plantas.

2.2 Caracterização climática

O clima do município de Patrocínio é classificado como Clima Subtropical Úmido, com inverno seco e estação chuvosa no verão (Cwb), segundo Koppen (ALVARES *et al.*, 2013).

Na Figura 1, estão apresentados os dados meteorológicos obtidos na estação da Fazenda Boa Vista - DATERRA Atividades Agrícolas, localizada em Patrocínio-MG. A condição climática caracterizou-se por estações seca e chuvosa bem definidas. No ano de 2019, as médias de temperatura máxima e mínima foram de 30.4 °C e 16.1 °C, respectivamente. O total anual de precipitação foi de 1299 mm (FIGURA 1A).

Figura 1 - Representação gráfica das variáveis climatológicas temperaturas máximas, média, mínima e precipitação registradas nos anos de 2019 (A) e 2020 (B).



Fonte: Fazenda Boa Vista - DATERRA Atividades Agrícolas, Patrocínio-MG. (2020)

Em agosto de 2019, verificou-se ausência de precipitação, bem como temperatura máxima de 29.6 °C e mínima de 14.5 °C (FIGURA 1A).

No ano de 2020, as temperaturas máxima e mínima apresentaram média de 29.4 °C e 15.9 °C, respectivamente, já a precipitação anual foi de 1402 mm. Em janeiro de 2020,

verificou-se precipitação de 282 mm e temperaturas máxima e mínima de 30.3 °C e 18.7 °C, respectivamente (FIGURA 1B).

2.3 Avaliações fisiológicas, bioquímicas e anatômicas foliares

Para as avaliações fisiológicas, bioquímicas e anatômicas foliares foram utilizadas folhas completamente expandidas do terceiro ou quarto par do ramo plagiotrópico, na parte mediana da planta. As avaliações foram realizadas em dois períodos sazonais distintos, no período seco (agosto -2019) e no período chuvoso (janeiro - 2020).

2.4 Condutância estomática

A avaliação de condutância estomática ($gs - mmol m^{-2}s^{-1}$) foi realizada no período entre 8 e 11 horas da manhã, com auxílio de um porômetro (SC -1, Decagon Devises) na face abaxial das folhas.

2.5 Potencial hídrico na antemanhã

Para determinação do potencial hídrico foliar utilizou-se uma câmara de pressão tipo Scholander (PMS Instruments Plant Moisture- Modelo 1000) e as avaliações foram realizadas antes do amanhecer (potencial hídrico de antemanhã).

2.6 Análises bioquímicas

Para as análises bioquímicas, coletou-se as folhas no período da tarde, entre 12 e 13h, e estas foram acondicionadas em nitrogênio líquido e armazenadas em ultra freezer (-80 °C), para posterior maceração e obtenção dos extratos.

2.7 Quantificação de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e peroxidação lipídica

Para a quantificação de H₂O₂ foram macerados 100 mg do material vegetal em nitrogênio líquido e polivinilpirrolidona (PVPP) e homogeneizado em ácido tricloroacético 0.1% (TCA). As amostras foram centrifugadas a 12000g por 15 minutos, a 4 °C. Posteriormente, coletou-se o sobrenadante e as alíquotas foram adicionadas ao meio de reação

composto por tampão fosfato de potássio (10Mm, pH 7.0) e iodeto de potássio (1M). A concentração de H₂O₂ foi determinada pela absorbância das amostras a 390nm, utilizando a curva-padrão de concentrações de H₂O₂ conhecidas (VELIKOVA; YORDANOV; EDREVA, 2000), com modificações.

Determinou-se a peroxidação lipídica por meio da quantificação de espécies reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBA), conforme metodologia proposta por Buege e Aust (1978). As alíquotas foram adicionadas ao meio de reação composto por 0.5% (m/v) de ácido tiobarbitúrico (TBA) e 10% (m/v) de TCA. Em seguida, o meio foi incubado a 95 °C, por 30 minutos. A reação foi paralisada por resfriamento rápido em gelo e as leituras realizadas a 535 nm e 600 nm. O TBA forma complexos de cor avermelhada, como o malondialdeído (MDA), produto secundário do processo de peroxidação. A concentração do MDA foi calculada pela seguinte equação: $[MDA] = (A_{535} - A_{600}) / (\xi \times b)$, em que ξ (coeficiente de extinção molar = $1,56 \times 10^5$); b (comprimento ótico = 1). A peroxidação foi expressa em mmol de MDA.g⁻¹MF.

2.8 Metabolismo antioxidante

Para a determinação da atividade das enzimas do sistema antioxidante foram macerados 100 mg do material vegetal em nitrogênio líquido e polivinilpolipirrolidona (PVPP), posteriormente homogeneizado com 3.5 mL do seguinte tampão de extração: fosfato de potássio 100 mM (pH 7.8), EDTA 0.1 mM e ácido ascórbico 10 mM. O extrato foi centrifugado a 13.000g por 10min, a 4 °C. Os sobrenadantes foram coletados e utilizados para as análises das enzimas: catalase (CAT), dismutase do superóxido (SOD) e peroxidase do ascorbato (APX) (BIEMELT; KELTMAN; ALBERT, 1998).

Para a determinação da atividade CAT utilizou-se o protocolo de Mengutay *et al.* (2013) com modificações. As alíquotas das amostras foram adicionadas ao meio de incubação, composto por tampão fosfato (45 mM, pH 7.6), Na₂EDTA (0.1 mM) (dissolvido no tampão fosfato) e peróxido de hidrogênio (10 mM). A atividade da enzima foi determinada pelo decréscimo na absorbância a 240 nm, a cada 15 segundos, por 3 minutos, monitorado pelo consumo de peróxido de hidrogênio. O coeficiente de extinção molar utilizado foi 36 mM⁻¹cm⁻¹.

A atividade da SOD foi avaliada pela capacidade da enzima em inibir a fotoredução do azul de nitrotetrazólio (NBT), de acordo com a metodologia proposta por Giannopolis e Ries (1977) com modificações. As alíquotas das amostras foram adicionadas ao meio de incubação composto por fosfato de potássio (50 mM, pH 7.8), metionina (14 mM), EDTA (0.1 μM), NBT

(75 μM), riboflavina (2 μM) e água destilada. Posteriormente, as microplacas foram iluminadas com lâmpada fluorescente de 20 W por sete minutos e realizaram-se as leituras a 560 nm. Uma unidade da SOD corresponde à quantidade de enzima necessária para inibir em 50% a fotoredução do NBT nas condições do ensaio.

A atividade da APX foi determinada pelo acompanhamento da taxa de oxidação do ascorbato a 290 nm, a cada 15 segundos, por 3 minutos, de acordo com a metodologia proposta por Nakano e Asada (1981), com modificações. As alíquotas das amostras foram adicionadas ao meio de incubação contendo tampão fosfato de potássio (50 mM, pH 6.0), ácido ascórbico (0.8 mM) e peróxido de hidrogênio (1 mM). O coeficiente de extinção molar utilizado foi $2.8\text{mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$ (NAKANO; ASADA, 1981).

2.9 Quantificação do ascorbato

Para a quantificação de ascorbato (AsA) utilizou-se 50 mg do material vegetal, que foram macerados em nitrogênio líquido e polivinilpolipirrolidona (PVPP) e homogeneizado com ácido tricloroacético (TCA 5%) (m/v). Em seguida, centrifugado a 10.000 g, por 15 min, a 4° C. Posteriormente, as alíquotas das amostras foram adicionadas ao meio de reação composto por TCA (5% - m/v), etanol (99.8% - v/v), ácido ascórbico, ácido fosfórico (H_3PO_4) (0.4% em etanol - v/v), bathophenantrolina (0.5% em etanol - p/v) e cloreto de ferro (III) (FeCl_3) (0.03% em etanol - m/v). Depois, este meio foi homogeneizado e incubado a 30 °C, por 90 minutos. Realizou-se as leituras das amostras a 534 nm, utilizando a curva-padrão com concentrações conhecidas (ARAKAWA *et al.*, 1981).

Para todas as análises bioquímicas utilizou-se microplacas de microtitulação de 96 poços e as leituras foram realizadas em leitora de microplacas por multidetecção Synergy TM HTX.

2.10 Anatomia foliar

As secções paradérmicas foliares foram obtidas por meio da impressão da epiderme pelo método impressão com adesivo instantâneo universal (éster de cianoacrilato) (Super Bonder®) (SEGATTO *et al.*, 2004).

Para a análise das seções transversais, as folhas coletadas foram fixadas em álcool 70% (v v⁻¹) (JOHANSEN, 1940) e, após 72 horas, colocadas em nova solução de álcool 70% (v v⁻¹) visando a conservação do material, em temperatura ambiente até a data das análises.

O material vegetal foi desidratado em série etélica crescente (80%, 90% e 100% - v v⁻¹) e após a desidratação, passou pelos processos de infiltração e polimerização em historesina a 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 micrótopo 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 verniz vitral (Acrilex Tintas Especiais S. A.) como meio de montagem.

As lâminas foram observadas e fotografadas em microscópio óptico, modelo Red 200 da marca Kasvi/Motic, acoplado à câmera digital modelo Moticom 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).

Para as secções paradérmicas, foram analisados: densidade estomática (DEN - número de estômatos/mm²) e os diâmetros polar e equatorial do estômato, a partir dos quais obteve-se a relação diâmetro polar/diâmetro equatorial dos estômatos (DPDE).

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 - µm²), área total da região do floema (AF - µm²), frequência dos vasos do xilema (FVX - NVX/AX*1000000, mm²) e índice de vulnerabilidade dos vasos do xilema (IV = DVX/ FVX) conforme proposto por Carlquist (1988). A condutividade hidráulica relativa (CHR) foi estimada usando equação de Hagen - Poiseuille modificada por Fahn et al., 1986, onde: CHR = r⁴*FVX, µ⁴m10⁶), onde r é o raio individual dos vasos xilemáticos (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

2.11 Desempenho produtivo e qualidade de bebida

Para a determinação da produtividade foram realizadas colheitas por derriça total de frutos nos anos de 2019 e 2020, considerando as dez plantas da parcela experimental. Para a estimativa da produtividade coletou-se uma amostra de 4 L de cada parcela experimental, acondicionadas em sacos de polietileno trançado até a secagem atingir aproximadamente 11%

de teor de umidade. As amostras foram pesadas antes e depois da secagem e após o beneficiamento para determinar a renda e conversão da produtividade em sacas ha^{-1} de café beneficiado, de acordo com a renda de cada parcela experimental.

Já para a análise sensorial, foi considerada a colheita do ano de 2019, sendo que após a colheita os frutos foram lavados em uma caixa de polietileno com capacidade de 500 litros, a fim de retirar os frutos mal granados, secos, além de impurezas. Posteriormente, separou-se uma amostra de 7 L (de cada parcela) composta somente por frutos no estágio 'cereja'. O genótipo 4 não teve volume de frutos suficiente para a análise sensorial e granulométrica.

Os frutos colhidos foram submetidos à secagem em peneiras mantidas em terreiro suspenso (a um metro do solo) com revolvimento constante, até atingir o teor de umidade de 11%. Após a secagem, as amostras destinadas à análise sensorial foram acondicionadas em sacos de papel kraft, revestidos por um saco plástico, e armazenadas por um período de 30 dias em câmara fria com temperatura controlada em 16 °C, para uniformização do teor de água nos grãos. Após esse período, as amostras foram beneficiadas com auxílio de um processador portátil DRC-2 nº307 (Pinhalense, São Paulo, SP, Brasil). Posteriormente, foram acondicionadas em sacos plásticos impermeáveis até o momento das análises sensoriais e físicas.

Para a análise sensorial, as amostras foram padronizadas e ausentes de defeitos intrínsecos e extrínsecos. A análise foi realizada por três provadores credenciados (Q-Graders). Foram avaliados os atributos sensoriais: aroma, corpo, acidez, finalização, equilíbrio, nota final e nota total dos genótipos, de acordo com a metodologia proposta pela Associação de Cafés Especiais (SCA) (LINGLE, 2011).

Já para a análise granulométrica foi utilizada uma amostra de 300 gramas de grão cru beneficiado, ausentes de defeitos extrínsecos e pedaços de grãos. Utilizou-se um conjunto de peneiras de crivos circulares (grãos chatos), de acordo com a Instrução Normativa nº 8 do MAPA (BRASIL, 2003). Para a estimativa dos grãos graúdos (16 acima), considerou-se a soma dos pesos dos grãos retidos nas peneiras 16, 17, 18 e 19, que foi expressa em porcentagem.

2.12 Análises estatísticas

As análises dos dados foram realizadas no programa Sisvar versão 5.6 (FERREIRA, 2014) e as médias obtidas foram comparadas entre si pelo teste Scott-Knott, quando observada a significância pelo teste F ($p \leq 0.05$).

Para verificar a distinção entre os genótipos nos períodos seco e chuvoso, além das correlações entre as características avaliadas, utilizou-se a análise de componentes principais. Os valores médios foram padronizados de forma a ter média zero e variância unitária, utilizou-se a biblioteca FactoMineR e o software R versão 4.0.3 (R CORE TEAM, 2020).

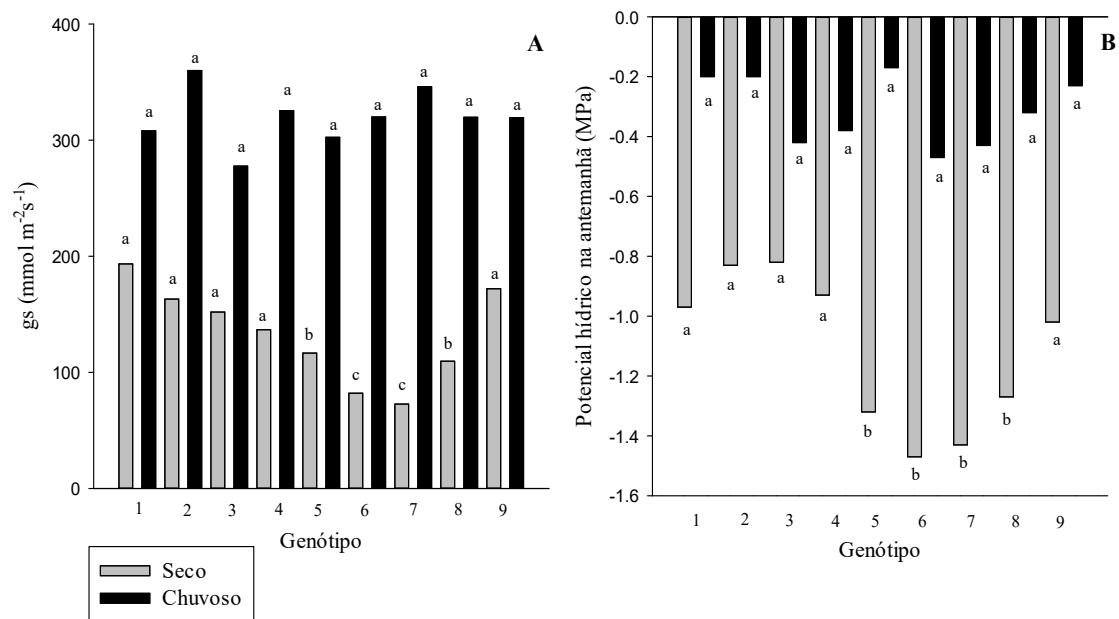
3 RESULTADOS

3.1 Condutância estomática e potencial hídrico na antemanhã

Na Figura 2 A e B, estão apresentados os valores médios de condutância estomática e potencial hídrico na antemanhã dos genótipos de *Coffea arabica* L. em dois períodos sazonais. Não foi verificada diferença significativa para a interação entre genótipo e período sazonal. No entanto, verificou-se distinção dos genótipos quanto a condutância estomática e o potencial hídrico de antemanhã no período seco. Os menores valores médios de condutância estomática foram observados nas plantas dos genótipos 6 e 7, que também apresentaram baixo potencial hídrico na antemanhã. Em contrapartida, as plantas dos genótipos 5 e 8 mesmo sob baixo potencial hídrico na antemanhã mantiveram valores médios intermediários de condutância estomática (FIGURA 2 A e B).

Já nas plantas dos genótipos 1, 2, 3, 4 e 9 observou-se maiores valores médios de condutância estomática associados a maiores valores médios de potencial hídrico na antemanhã (FIGURAS 2 A e B).

Figura 2 - Valores médios de condutância estomática (gs) (A) e potencial hídrico na antemanhã (B) de genótipos de *Coffea arabica* L. pertencentes ao Banco Ativo de Germoplasma da Epamig em dois períodos sazonais.



Fonte: Da autora (2021).

No período chuvoso, não se observou diferença significativa quanto à condutância estomática e potencial hídrico na antemanhã para os genótipos avaliados (FIGURAS 2 A e B).

3.2 Análises bioquímicas

Para peróxido de hidrogênio não foi verificada diferença significativa entre os genótipos (G), período sazonal (P), bem como para a interação entre G x P. Para os níveis de malondialdeído, verificou-se diferença somente quanto aos genótipos avaliados, no entanto, todos permaneceram no mesmo grupo, de acordo com o teste de Scott-Knott. Tanto para peróxido de hidrogênio, como para conteúdo de malondialdeído (TABELA 2).

Tabela 2 - Níveis de peróxido de hidrogênio (H_2O_2 - $\text{mmol H}_2\text{O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ MF}$) e de malondialdeído (MDA - $\text{mmol MDA g}^{-1} \text{ MF}$) em genótipos de *Coffea arabica* L. avaliados em dois períodos sazonais.

Genótipo	H_2O_2	MDA
1	3.17 a	69.30 a
2	3.45 a	73.76 a
3	2.92 a	69.33 a
4	3.79 a	89.04 a
5	3.58 a	62.62 a
6	2.69 a	59.16 a
7	2.37 a	55.89 a
8	1.76 a	55.08 a
9	1.66 a	57.16 a

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

Fonte: Da autora (2021).

No entanto, verificou-se maior valor médio de peróxido de hidrogênio no período seco em relação ao período chuvoso (TABELA 3).

Tabela 3 - Níveis de peróxido de hidrogênio (H_2O_2 - $\text{mmol H}_2\text{O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ MF}$) em genótipos de *Coffea arabica* L. avaliados em dois períodos sazonais.

PERÍODO	H_2O_2
SECO	3.10 a
CHUVOSO	2.54 b

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

Fonte: Da autora (2021).

Para a atividade das enzimas avaliadas verificou-se diferença significativa na interação entre G x P para a enzima superóxido dismutase (SOD) e para os níveis de ascorbato (AsA). Durante o período seco, observou-se maiores níveis de AsA nas plantas dos genótipos 2 e 5 em relação ao período chuvoso. Considerando somente o período seco, maiores níveis de AsA foram observados nas plantas do genótipo 1 em relação aos demais genótipos. Em contrapartida, os menores níveis de AsA foram verificados nas plantas dos genótipos 8 e 9. No período chuvoso, as plantas dos genótipos 1 e 3 apresentaram maiores níveis desse antioxidante (TABELA 4).

Tabela 4 - Atividade das enzimas catalase (CAT - $\mu\text{M H}_2\text{O}_2 \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ MF}$), superóxido dismutase (SOD - $\text{U SOD min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ MF}$), ascorbato peroxidase (APX - $\mu\text{M AsA min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ MF}$) e níveis de ascorbato (AsA - $\text{mg AsA g}^{-1} \text{ MF}$) em genótipos de *Coffea arabica* L. avaliados em dois períodos sazonais.

Genótipo	CAT		SOD	
	SECO	CHUVOSO	SECO	CHUVOSO
1	0.004 a	0.031 a	0.36 a A	0.24 c B
2	0.010 a	0.026 a	0.36 a A	0.22 c B
3	0.038 a	0.028 a	0.31 b A	0.31 b A
4	0.021 a	0.025 a	0.31 b A	0.30 b A
5	0.021 a	0.017 a	0.30 b A	0.29 b A
6	0.021 a	0.022 a	0.31 b A	0.30 b A
7	0.021 a	0.019 a	0.29 b A	0.32 b A
8	0.016 a	0.019 a	0.30 b A	0.31 b A
9	0.019 a	0.013 a	0.31 b B	0.35 a A

Genótipo	APX		AsA	
	SECO	CHUVOSO	SECO	CHUVOSO
1	0.07 a	0.04 a	47.74 a A	43.39 a A
2	0.04 a	0.07 a	39.10 b A	34.45 b B
3	0.21 a	0.11 a	37.13 b A	40.81 a A
4	0.15 a	0.15 a	34.54 c A	33.99 b A
5	0.06 a	0.07 a	41.74 b A	29.22 c B
6	0.10 a	0.09 a	34.36 c A	32.67 b A
7	0.10 a	0.12 a	31.76 c A	32.93 b A
8	0.08 a	0.11 a	28.25 d A	32.20 b A
9	0.13 a	0.07 a	28.79 d A	27.60 c 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 probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

Já para a enzima SOD, maiores valores médios foram observados nas plantas dos genótipos 1 e 2 no período seco em relação ao período chuvoso. No período seco, maiores valores médios foram verificados nas plantas dos genótipos 1 e 2 em relação aos demais. Já no período chuvoso, maior atividade dessa enzima foi verificada nas plantas do genótipo 9 em relação aos demais (TABELA 4).

3.3 Características anatômicas foliares

No período seco, quanto à espessura da cutícula da face adaxial (CUT), observou-se maiores valores médios nas plantas dos genótipos 1, 2, 3, 4 e 6, em relação ao período chuvoso. Em contraste, as plantas dos genótipos 7 e 8 apresentaram maior espessura dessa camada durante o período chuvoso. Nas plantas do genótipo 3 destacou-se em relação aos demais, por

apresentar maior espessura da cutícula da face adaxial nos dois períodos sazonais avaliados (TABELA 5).

Tabela 5 - Valores médios da espessura da cutícula da face adaxial (CUT - μm) e do limbo foliar (LIM - μm) avaliados em genótipos de *Coffea arabica* L. em dois períodos sazonais.

Genótipo	CUT		LIM	
	SECO	CHUVOSO	SECO	CHUVOSO
1	4.53 b A	4.42 b B	320.19 a A	294.29 b B
2	4.57 b A	4.44 b B	267.43 c A	271.90 c A
3	4.91 a A	4.68 a B	232.73 c B	241.35 e A
4	4.52 b A	4.43 b B	276.37 c A	242.68 e B
5	4.41 c A	4.41 b A	307.58 b A	302.91 a A
6	5.51 b A	4.45 b B	252.46 c A	244.20 e B
7	4.36 c B	4.43 b A	255.86 c A	248.70 e B
8	4.36 c B	4.44 b A	260.60 c A	257.27 d A
9	4.46 b A	4.48 b A	251.99 c A	254.14 d A

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 probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

Em relação ao limbo foliar, observou-se durante o período seco, maior espessura desse tecido nas plantas dos genótipos 1, 4, 6 e 7, quando comparados aos valores observados no período chuvoso. Nas plantas do genótipo 3, maior espessura do limbo foliar foi observada durante o período chuvoso (TABELA 5).

No que se refere aos vasos condutores, observou-se maior área do floema nas plantas dos genótipos 2 e 3, durante o período seco em relação ao período chuvoso. Para esta característica, não foi observada diferença significativa entre os genótipos avaliados dentro do período sazonal. Em relação à área do xilema, observou-se maiores valores médios dessa característica durante o período seco para as plantas dos genótipos 3, 4 e 7. Considerando somente o período chuvoso, maior área do xilema foi verificada nas plantas do genótipo 3 em relação aos demais. Em contrapartida, as plantas dos genótipos 4, 6, 8 e 9 apresentaram menores valores médios dessa característica (TABELA 6).

Tabela 6 - Valores médios de área do floema e xilema (AF, AX - μm^2), diâmetro de vaso do xilema (DVX - μm), frequência de vasos do xilema (FVX), índice de vulnerabilidade (IV) e condutividade hidráulica relativa (CHR - $\mu\text{m}^4 10^6$) avaliados em genótipos de *Coffea arabica* L. em dois períodos sazonais.

Genótipo	AF		AX		FVX	
	SECO	CHUVOSO	SECO	CHUVOSO	SECO	CHUVOSO
1	72579.31 a A	71620.94 a A	94441.69 a A	92941.11 b A	1308.77 b A	1398.31 a A
2	81886.31 a A	73822.92 a B	93392.78 a A	91941.56 b A	1196.06 c B	1329.04 a A
3	101356.24 a A	84879.38 a B	124282.06 a A	104350.98 a B	1024.27 d B	1221.59 a A
4	56043.46 a A	52239.78 a A	104045.58 a A	85082.96 c B	1195.29 c B	1442.67 a A
5	73067.35 a A	69265.87 a A	94079.87 a A	93886.93 b A	1395.39 a A	1371.35 a A
6	67262.97 a A	64276.92 a A	80256.21 a A	83345.14 c A	1446.98 a A	1399.09 a A
7	65735.20 a A	60804.53 a A	106122.74 a A	91744.76 b B	1308.17 b B	1411.07 a A
8	60695.02 a A	63746.94 a A	73809.04 a B	82005.49 c A	1568.57 a A	1532.70 a A
9	76128.27 a A	70703.71 a A	82825.56 a A	83306.73 c A	1485.30 a A	1573.66 a A

Genótipo	DVX		IV		CHR	
	SECO	CHUVOSO	SECO	CHUVOSO	SECO	CHUVOSO
1	22.13 b A	21.40 a B	0.017 c A	0.016 a A	19.65 a A	19.24 a A
2	22.02 b A	20.73 a B	0.018 b A	0.016 a B	17.05 b A	16.08 b A
3	22.84 a A	21.46 a B	0.022 a A	0.018 a B	17.65 b A	15.72 b B
4	19.06 c A	17.64 c B	0.016 c A	0.013 a B	10.21 e A	8.71 e B
5	18.84 c A	18.79 b A	0.013 d A	0.014 a A	11.95 d A	11.21 c A
6	19.48 c A	18.75 b B	0.014 d A	0.013 a A	13.07 c A	11.37 c B
7	19.84 c A	18.59 b B	0.016 c A	0.014 a B	11.78 d A	9.76 d B
8	17.16 d A	17.32 c A	0.011 e A	0.012 a A	9.15 e A	8.85 e A
9	17.57 d A	17.05 c A	0.011 e A	0.010 a A	13.11 c A	9.86 d 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 probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

A maior frequência de vasos do xilema foi observada nas plantas dos genótipos 2, 3, 4 e 7 durante o período chuvoso em comparação ao período seco. Quando analisado somente o período seco, as plantas dos genótipos 5, 6, 8 e 9 apresentaram maior frequência dos vasos do xilema associados a menor diâmetro dos vasos em relação aos demais genótipos. Em contrapartida, as plantas dos genótipos 2 e 3 apresentaram menor frequência de vasos associados a maior diâmetro de vasos do xilema durante o período seco (TABELA 6).

Maiores valores médios do diâmetro dos vasos do xilema foram observados no período seco, para a maioria dos genótipos avaliados. No período seco, maior DVX foi observado nas plantas do genótipo 3, em contrapartida, as plantas dos genótipos 8 e 9, apresentaram menor DVX no mesmo período. Em relação ao período chuvoso, os maiores DVX foram verificados nas plantas dos genótipos 1, 2 e 3; já as plantas dos genótipos 4, 8 e 9 apresentaram menores DVX (TABELA 6).

Quanto ao índice de vulnerabilidade dos vasos do xilema, verificou-se maiores valores médios nas plantas dos genótipos 2, 3, 4 e 7 no período seco em relação ao período chuvoso. Em contrapartida, as plantas dos genótipos 1, 5, 6, 8 e 9 mantiveram valores semelhantes nos dois períodos. Considerando somente o período seco os genótipos que apresentaram menores valores médios de IV foram 8, 9, seguidos pelas plantas dos genótipos 5 e 6 em relação aos demais genótipos avaliados (TABELA 6).

Em relação a condutividade hidráulica relativa, as plantas dos genótipos 3, 4, 6, 7 e 9 apresentaram maiores valores médios durante o período seco em relação ao período chuvoso (TABELA 6). No período seco, o maior valor médio de CHR foi observado nas plantas do genótipo 1, em contrapartida os menores valores médios dessa característica foram observados nas plantas dos genótipos 4 e 8 (TABELA 6).

As características dos estômatos são apresentadas na Tabela 7. Para densidade estomática observou-se diferença significativa para genótipo e período sazonal. No entanto, todos os genótipos foram agrupados em um só grupo de acordo com o teste de Scott-Knott. Em relação a característica de DPDE verificou-se maior relação nas plantas dos genótipos 6 e 7 durante o período seco quando comparado ao período chuvoso. Considerando o período seco, maiores valores médios dessa característica foram observados nas plantas dos genótipos 3, 6, 7, 8 e 9. Já no período chuvoso, as plantas dos genótipos 3, 8 e 9 apresentaram maiores valores médios da relação DPDE (TABELA 7).

Tabela 7 - Valores médios de densidade estomática (número de estômatos/mm²) e relação entre diâmetro polar e equatorial de estômatos (DPDE) avaliados em genótipos de *Coffea arabica* L. em dois períodos sazonais.

Genótipo	DEN	DPDE	
		SECO	CHUVOSO
1	149.57 a	1.58 c A	1.64 b A
2	158.30 a	1.69 b A	1.61 b A
3	127.99 a	1.81 a A	1.84 a A
4	143.32 a	1.70 b A	1.63 b A
5	142.25 a	1.72 b A	1.73 b A
6	141.04 a	1.81 a A	1.65 b B
7	171.72 a	1.76 a A	1.68 b B
8	145.51 a	1.85 a A	1.85 a A
9	159.96 a	1.86 a A	1.86 a A

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 probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

Quanto ao período sazonal, verificou-se maior densidade estomática no período chuvoso (TABELA 8).

Tabela 8 - Valores médios de densidade estomática (número de estômatos/mm²) de genótipos de *Coffea arabica* L avaliados em dois períodos sazonais.

Período	DEN
SECO	143.21 b
CHUVOSO	154.49 a

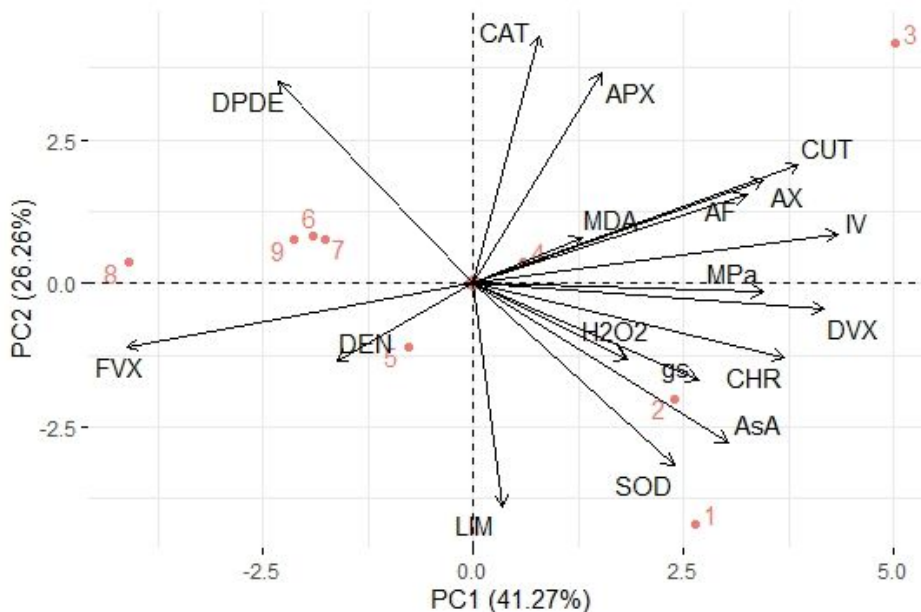
Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

3.4 Dispersão de genótipos de *Coffea arabica* L. e correlação entre características fisiológicas, bioquímicas e anatômicas foliares em dois períodos sazonais

Na Figura 3 está apresentada a projeção dos vetores e a dispersão dos genótipos no período seco. As características de espessura da cutícula da face adaxial (CUT), área do xilema e floema, atividade das enzimas CAT e APX, além do índice de vulnerabilidade diferenciou o genótipo 3 dos demais. Já o genótipo 1 se diferenciou pelos maiores níveis de SOD, maior conteúdo de AsA, maior espessura do LIM e maior CHR (FIGURA 3; TABELAS 4, 5 e 6).

Figura 3 - Projeção de vetores e dispersão de genótipos de *Coffea arabica* L. no período seco, em relação aos dois primeiros componentes principais.



Variáveis fisiológicas: condutância estomática (gs), potencial hídrico na antemanhã (MPa). Variáveis bioquímicas: peróxido de hidrogênio (H₂O₂), malondialdeído (MDA), catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD), ascorbato peroxidase (APX) e ascorbato (AsA). Variáveis anatômicas foliares: espessura do limbo foliar (LIM), espessura da cutícula da face adaxial (CUT), densidade estomática (DEN), relação entre diâmetro polar e equatorial (DPDE), área do floema (AF), área do xilema (AX), diâmetro dos vasos do xilema (DVX), frequência de vasos do xilema (FVX), índice de vulnerabilidade (IV) e condutividade hidráulica relativa (CHR).

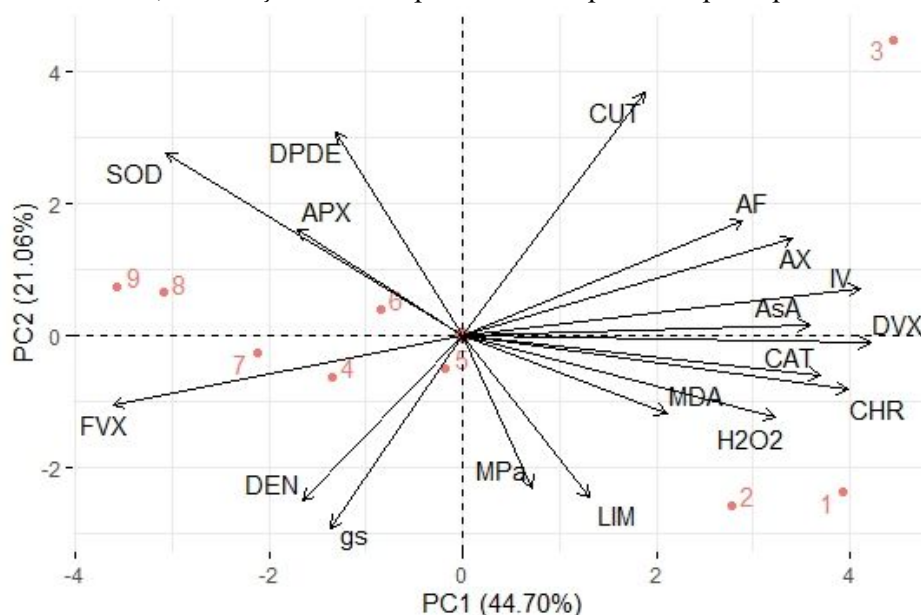
Fonte: Da autora (2021).

O genótipo 2 se distinguiu dos demais por apresentar maiores valores de condutância estomática, conteúdo de AsA e atividade da enzima SOD. Os maiores níveis de MDA diferenciaram o genótipo 4 dos demais (FIGURAS 2 e 3; TABELA 4).

A maior frequência dos vasos do xilema (FVX) associada ao menor índice de vulnerabilidade dos vasos do xilema, diferenciaram as plantas dos genótipos 5, 6, 8 e 9 dos demais. Dentre esses, o genótipo 5 também apresentou maior densidade estomática. Já as plantas dos genótipos 6, 8, 7 e 9, se destacaram por apresentarem maior relação DPDE (FIGURA 3; TABELAS 6 e 7).

No período chuvoso, o genótipo 3 se diferenciou dos demais pela maior espessura da CUT, maior AX e AF, IV e maior DVX, tal qual observado no período seco (FIGURAS 3 e 4). Já as plantas dos genótipos 1 e 2 se diferenciaram por apresentarem maior MPa, CHR, maior espessura do LIM e maiores valores de H₂O₂ e MDA (FIGURA 4).

Figura 4 - Projeção de vetores e dispersão de genótipos de *Coffea arabica* L. no período chuvoso, em relação aos dois primeiros componentes principais.



Variáveis fisiológicas: condutância estomática (gs), potencial hídrico na antemanhã (MPa). Variáveis bioquímicas: peróxido de hidrogênio (H₂O₂), malondialdeído (MDA), catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD), ascorbato peroxidase (APX) e ascorbato (AsA). Variáveis anatômicas foliares: espessura do limbo foliar (LIM), espessura da cutícula da face adaxial (CUT), densidade estomática (DEN), relação entre diâmetro polar e equatorial (DPDE), área do floema (AF), área do xilema (AX), diâmetro dos vasos do xilema (DVX), frequência de vasos do xilema (FVX), índice de vulnerabilidade (IV) e condutividade hidráulica relativa (CHR).

Fonte: Da autora (2021).

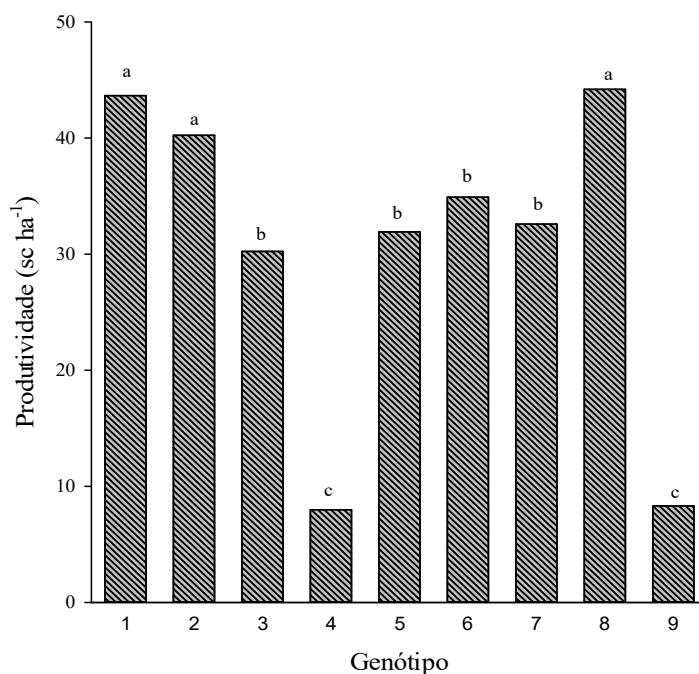
As plantas dos genótipos 4, 6, 7, 8 e 9 se distinguiram dos demais por apresentarem maior frequência de vasos do xilema e atividade da enzima SOD (FIGURA 4, TABELAS 4 e

6). Além disso, as plantas dos genótipos 4, 7 e 8 também apresentaram maior atividade da enzima APX (FIGURA 4, TABELA 4). A maior relação DPDE foi verificada nas plantas dos genótipos 8 e 9, o que contribuiu para a dispersão dos mesmos (FIGURA 4, TABELA 6).

3.5 Desempenho produtivo e qualidade de bebida

A produtividade dos genótipos avaliados é representada na Figura 5. Maiores valores médios foram observados nas plantas dos genótipos 1, 2 e 8, seguidas pelos genótipos 3, 5, 6 e 7. Em contrapartida, menores valores médios de produtividade foram observados nas plantas dos genótipos 4 e 9 (FIGURA 5).

Figura 5 - Produtividade média de grãos (sc ha⁻¹) dos anos de 2019 e 2020 de genótipos de *Coffea arabica* L. pertencentes ao Banco Ativo de Germoplasma da Epamig.



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

Fonte: Da autora (2021).

Em relação aos atributos sensoriais, verificou-se variabilidade dentre os genótipos avaliados. Destacaram-se as plantas dos genótipos 1, 3 e 6, que apresentaram maiores notas nos atributos aroma, finalização e nota final. Embora não tenha sido observada diferença entre os genótipos, a porcentagem de grãos de grãos graúdos foi maior nas plantas dos genótipos 1, 2 e 6 (TABELA 10).

Tabela 10 - Valores médios de atributos sensoriais e valores médios de retenção de grãos de café em peneiras altas (%) no ano de 2019 de genótipos de *Coffea arabica* L pertencentes ao Banco Ativo de Germoplasma da EPAMIG.

Genótipo	Aroma	Sabor	Corpo	Acidez	Finalização	Equilíbrio	Final	Total	16AC
1	7.7 a	8.0 a	8.0 a	8.0 a	8.0 a	7.5 a	8.0 a	85.17 a	93.00 a
2	7.5 b	8.0 a	7.8 a	7.8 a	8.0 a	7.5 a	7.5 b	84.17 a	77.00 a
3	7.6 a	8.0 a	8.0 a	8.0 a	7.9 a	7.6 a	7.8 a	84.83 a	58.00 a
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	7.5 b	7.7 a	7.6 a	7.7 a	7.6 b	7.5 a	7.5 b	83.13 a	56.25 a
6	7.5 b	8.0 a	8.0 a	8.0 a	8.0 a	7.7 a	7.8 a	84.92 a	78.00 a
7	7.5 b	7.8 a	7.8 a	7.8 a	7.5 b	7.6 a	7.5 b	83.42 a	72.50 a
8	7.5 b	7.8 a	7.8 a	7.7 a	7.6 b	7.5 a	7.5 b	83.46 a	58.00 a
9	7.5 b	7.8 a	7.8 a	7.7 a	7.6 b	7.5 a	7.5 b	83.52 a	51.00 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 probabilidade.

Fonte: Da autora (2021).

4 DISCUSSÃO

As variações climáticas como radiação, temperatura e déficit hídrico induzem às respostas adaptativas das plantas às condições ambientais, que permitem sua sobrevivência (BALIZA *et al.*, 2012; MENEZES-SILVA *et al.*, 2017). O presente estudo verificou adaptações nas características fisiológicas, bioquímicas e anatômicas em genótipos de Híbrido de Timor e duas cultivares ao período seco. Além de aspectos produtivos e qualitativos dos genótipos avaliados.

O fechamento estomático é a primeira resposta da planta à restrição hídrica (TORRE *et al.*, 2021). Embora não tenha sido verificada diferença significativa para potencial hídrico entre os dois períodos sazonais avaliados, quando considerado o período seco observou-se nas plantas dos genótipos 5, 6, 7 e 8 menores valores médios de potencial hídrico na antemanhã em relação aos demais, e houve redução na condutância estomática dos mesmos (FIGURAS 2 A e B). Esta redução pode afetar a fotossíntese, uma vez que limita a absorção de CO₂ (MARTINS *et al.*, 2019; TORRE *et al.*, 2021).

O período seco leva as plantas a um estresse natural e as mudanças nas condições ambientais podem levar a superprodução de espécies reativas de oxigênio (EROs), como o radical superóxido, peróxido de hidrogênio e radicais de hidroxila. Em condições normais a produção de EROs tem função de sinalização que atuam no crescimento e desenvolvimento das plantas (SACHDEV *et al.*, 2021).

Sob estresses abióticos, a superprodução de EROs causam danos celulares (SACHDEV *et al.*, 2021). O peróxido de hidrogênio e os níveis de malondialdeído são utilizados como

marcadores para avaliar danos causados por estresses bióticos e abióticos (HASSAN *et al.*, 2021; HASANUZZAMAN *et al.*, 2020). No presente trabalho, verificou-se maiores níveis de peróxido de hidrogênio, durante o período seco em relação ao período chuvoso (TABELA 3). Em relação aos níveis de malondialdeído, verificou-se distinção entre os genótipos, no entanto, todos permaneceram no mesmo grupo, sendo maiores valores médios observados nas plantas dos genótipos 4, 2 e 3 (TABELA 2).

Para manter as EROs em níveis não prejudiciais, as plantas ativam o sistema antioxidante composto de antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos (HASANUZZAMAN *et al.*, 2020; SACHDEV *et al.*, 2021). A enzima superóxido dismutase (SOD) tem função de catalisar o radical superóxido em H_2O_2 e O_2 (SHARMA *et al.*, 2012), esse é um mecanismo de fotoproteção e a primeira linha de defesa do sistema antioxidante (HASSAN *et al.*, 2021). Neste estudo, observou-se maior atividade da enzima SOD nas plantas dos genótipos 1 e 2 no período seco em relação ao período chuvoso (TABELA 4), esse pode ser um mecanismo desses genótipos para neutralizar os efeitos deletérios das EROs.

As enzimas catalase (CAT) e peroxidase do ascorbato (APX) também têm o importante papel na neutralização de EROs nas células vegetais (SHARMA *et al.*, 2012). Nas plantas do genótipo 3, durante o período seco, verificou-se maior atividade dessas enzimas, uma das características que o distinguiu dos demais genótipos avaliados de acordo com a análise de componentes principais (TABELA 4, FIGURA 3).

O ácido ascórbico (AsA), um dos principais antioxidantes não enzimáticos, atua como doador de elétrons em reações enzimáticas e não enzimáticas na eliminação de EROs (HASANUZZAMAN *et al.*, 2020; SHARMA *et al.*, 2012). Durante o período seco, verificou-se maiores níveis de AsA nas plantas dos genótipos 2 e 5 em relação ao período chuvoso (TABELA 4). Esse pode ser um mecanismo de proteção desses genótipos, uma vez que a atividade do sistema antioxidante tem sido associada à capacidade da planta de tolerar períodos de deficiência hídrica (SALAHVARZI *et al.*, 2021).

As adaptações morfo-anatômicas têm sido consideradas importantes características na sobrevivência das plantas em condições secas. Esses ajustes anatômicos podem aumentar a resistência da folha contra a desidratação, bem como otimizar a absorção de CO_2 (ALDEROTTI *et al.*, 2020; HASANAGIC *et al.*, 2020).

Algumas características têm sido observadas em genótipos tolerantes à seca, como aumento na espessura da cutícula e do limbo foliar (QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2018). No presente trabalho, as plantas dos genótipos 1, 3, 2, 4 e 6 apresentaram maior espessura da cutícula da face adaxial durante o período seco em relação ao

período chuvoso. Destacaram-se as plantas do genótipo 3, que apresentou maior espessura nessa camada, tanto no período seco quanto no chuvoso (TABELA 5). Essa camada é uma importante barreira que pode isolar tecidos internos, aumentar a reflexão da radiação e diminuir a taxa transpiratória (KUMAR; TIESZEN, 1980; SILVA *et al.*, 2004).

O espessamento do limbo foliar pode evitar a transpiração excessiva, uma vez que o incremento das epidermes adaxial e abaxial funciona como uma barreira contra a transpiração. Além disso, maior espessura do parênquima esponjoso pode favorecer o armazenamento de CO₂ necessário para a realização da fotossíntese (CASTANHEIRA *et al.*, 2016; QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014). Neste estudo, as plantas dos genótipos 1, 4, 6 e 7 apresentaram maior espessura do limbo foliar no período seco em relação ao período chuvoso (TABELA 5). Resultados semelhantes foram observados por outros estudos, que verificaram maior espessura do limbo foliar nas plantas durante o período seco (QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2018).

A mudança no formato, tamanho e número de estômatos são adaptações que podem evitar a desidratação da planta (BATISTA *et al.*, 2010; DURAND; BRENDEL; THIEC, 2019). Durante o período seco maiores valores médios de DPDE foram observados nas dos genótipos 3, 6, 7, 8 e 9. Além disso, as plantas dos genótipos 6 e 7 que apresentaram baixa condutância estomática e potencial hídrico de antemã (FIGURA 2 A e B) tiveram maior relação DPDE no período seco em relação ao período chuvoso (TABELA 7). Essa é uma importante característica em condições de restrição hídrica, uma vez que o formato elipsoide do estômato favorece a fixação de CO₂ e reduz a transpiração excessiva (BATISTA *et al.*, 2010; GRISI *et al.*, 2008).

Sob restrição hídrica, a otimização no transporte de água e sais minerais é tão importante quanto evitar a desidratação (QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014). Neste estudo, as plantas dos genótipos 2 e 3 apresentaram maior área do floema durante o período seco em relação ao período chuvoso. Além disso, nas plantas do genótipo 3, assim como os genótipos 4 e 7, apresentaram maior área do xilema e condutividade hidráulica relativa no período seco em relação ao período chuvoso. Essas características podem favorecer o transporte de água, sais minerais e fotoassimilados (QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014). Por outro lado, as plantas dos genótipos 2 e 3 apresentaram menor frequência e maior diâmetro de vasos do xilema, características relacionadas a maior propensão a eventos de embolia (QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2018). Em contrapartida, as plantas dos genótipos 5, 6, 8 e 9 apresentaram maior frequência e menor diâmetro dos vasos do xilema durante o período seco, em relação aos demais (TABELA 6), características que diferenciaram esses genótipos dos

demais no período seco, verificado pela análise de componentes principais (FIGURA 3). Essas adaptações anatômicas foliares são importantes num cenário de restrição hídrica, visto que podem contribuir com a condutividade hidráulica da planta, como observado nas plantas dos genótipos 6 e 9. Estes, além de apresentarem maior FVX e menores DVX, mantiveram valores intermediários de condutividade hidráulica relativa (CHR) durante o período seco (FIGURA 3, TABELA 6).

Algumas características estão relacionadas à sensibilidade de um determinado genótipo à restrição hídrica, como o índice de vulnerabilidade dos vasos do xilema, que mede a suscetibilidade à cavitação na coluna d'água (OLIVEIRA *et al.*, 2018). No presente estudo, no período seco foi verificado maior índice de vulnerabilidade nas plantas dos genótipos 2, 3, 4 e 7 em relação ao período chuvoso. Considerando o período seco, o maior índice de vulnerabilidade foi observado nas plantas do genótipo 3, em contraste as plantas dos genótipos 8, 9, seguidos pelas plantas dos genótipos 5 e 6 apresentaram os menores índices de vulnerabilidade em relação aos demais (TABELA 6).

Na análise de componentes principais, verificou-se que as características de espessura da cutícula da face adaxial, área total dos vasos condutores (xilema e floema), índice de vulnerabilidade e menor frequência de vasos do xilema foram predominantes nas plantas do genótipo 3, tanto no período seco quanto no chuvoso (FIGURAS 3 e 4), sendo essas, provavelmente, intrínsecas ao genótipo. No período seco, esse genótipo permaneceu com maiores valores médios de condutância estomática e potencial hídrico na antemanhã (FIGURA 2 A e B), o que sugere que a manutenção do *status* hídrico pode ser em função de outras características. Além disso, de acordo com a análise de componentes principais (FIGURA 3) a atividade das enzimas CAT e APX distinguiu esse genótipo dos demais durante o período seco, o que demonstra respostas bioquímicas frente ao estresse natural (HASANUZZAMAN *et al.*, 2020; SHARMA *et al.*, 2012).

Nas plantas dos genótipos 1 e 2, no período seco verificou-se manutenção da condutância estomática e potencial hídrico na antemanhã (FIGURA 1 A e B). Além disso, o genótipo 1 se diferenciou dos demais pelos maiores níveis de SOD, maior conteúdo de AsA, maior espessura do LIM e maior CHR (FIGURA 3; TABELAS 4, 5 e 6). Já as plantas do genótipo 2 se destacaram por apresentar maiores valores de condutância estomática, conteúdo de AsA e atividade da enzima SOD (FIGURAS 2 A e 3; TABELA 4).

De maneira geral, verificou-se em todos os genótipos, adaptações fisiológicas, bioquímicas e anatômicas foliares frente ao período seco. No entanto, para atender aos programas de melhoramento genético do cafeeiro, é necessário que os genótipos apresentem

adaptações às condições climáticas e atendam aos aspectos agronômicos como produtividade e qualidade de bebida (DAVIS *et al.*, 2021).

Neste sentido, em relação à produtividade destacaram-se as plantas dos genótipos 1, 2, 8, seguidas pelas plantas dos genótipos 3, 5, 6 e 7 com produtividade entre 30 e 44 sc ha⁻¹ (FIGURA 5). Vale ressaltar, com exceção do genótipo 8, esses são genótipos de Híbrido de Timor (TABELA 1) material utilizado em programas de melhoramento genético do cafeeiro visando à resistência a doenças, principalmente a ferrugem do cafeeiro.

Em relação aos atributos sensoriais, verificou-se variabilidade dentre os genótipos para os atributos aroma, finalização e nota final, destacando-se as plantas dos genótipos 1, 3 e 6 (TABELA 10). O aroma está relacionado a compostos químicos característicos do café, composto por notas aromáticas presente nas amostras e que são verificadas antes e após a infusão (MALTA *et al.*, 2020; SCA, 2015). Já o atributo finalização tem relação com a duração do sabor agradável ao provar o café e a nota final consiste no reflexo do conjunto dos atributos avaliados (SENAR, 2017). No que se refere a nota total dos genótipos, todos apresentaram pontuação acima de 80 pontos (TABELA 10), dessa forma, são considerados cafés especiais, de acordo com o protocolo da SCA (SCA, 2015). Os resultados de qualidade de bebida observados para os genótipos do grupo de Híbrido de Timor corroboram com outros autores que verificaram potencial desse grupo para a produção de cafés especiais (MALTA *et al.*, 2020; SOBREIRA *et al.* 2015).

Os resultados demonstraram que todos os genótipos avaliados apresentaram adaptações ao período seco. Sendo que as principais características observadas foram manutenção do potencial hídrico e condutância estomática (genótipo 1, 2, 3, 4 e 9); adaptações anatômicas foliares, como maior frequência de vasos do xilema, maior relação DPDE, maior condutividade hidráulica relativa associado a menor índice de vulnerabilidade (genótipos 6 e 9); maior atividade das enzimas antioxidantes CAT e APX (genótipo 3); maior atividade da SOD e conteúdo de AsA (genótipos 1 e 2). Além disso, os genótipos apresentaram potencial para a produtividade e qualidade de bebida. Dentre os genótipos do grupo Híbrido de Timor destacaram-se os genótipos 1, 3 e 6 para aspectos produtivos associados a qualidade de bebida.

5 CONCLUSÃO

Os acessos de Híbrido de Timor, assim como as cultivares IPR100 e Rubi MG1192, apresentaram variabilidade quanto as características fisiológicas, bioquímicas e anatômicas foliares, conferindo diferentes mecanismos de adaptação ao período seco.

Destacaram-se os acessos Híbrido de Timor UFV 377-21 (genótipo 1), UFV 442-42 (genótipo 3), UFV 376-31 (genótipo 6), com adaptações ao período seco e potencial para a qualidade de bebida associado a maior produtividade.

REFERÊNCIAS

- ALDEROTTI, F. *et al.* Coordination of morpho-physiological and metabolic traits of *Cistus incanus* L. to overcome heatwave-associated summer drought: a two-year on-site field study. **Frontiers in Ecology and Evolution**, [s.l.], v. 8, n. 576296, p. 1-17, 2020.
- ALVARES, C.A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s.l.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ARAKAWA, N. *et al.* A rapid and sensitive method for the determination of ascorbic acid using 4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline. **Agricultural and Biological Chemistry**, [s.l.], v. 45, n. 5, p. 1289-1290, 1981.
- BATISTA, L.A. *et al.* Anatomia foliar e potencial hídrico na tolerância de cultivares de café ao estresse hídrico. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 3, p. 475-481, 2010.
- BIEMELT, S.; KEETMAN, U.; ALBRECHT, G. Re-aeration following hypoxia or anoxia leads to activation of the antioxidative defense system in roots of wheat seedlings. **Plant Physiology**, Rockville, v. 116, n. 2, p. 651-658, 1998.
- BRASIL. MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 8, de 11 de junho de 2003**. República Federativa do Brasil, Brasília, 2003. P.22-29.
- CAMARGO, A.P. de, CAMARGO, M.B.P de. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, [s.l.], v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001.
- CANALES, F.J. *et al.* Drought resistance in oat involves ABA-mediated modulation of transpiration and root hydraulic conductivity. **Environmental and Experimental Botany**, [s.l.], v. 182, n. 104333, p. 1-14, 2021.
- CARVALHO, A.; MEDINA FILHO, H.P.; FAZUOLI, L.C.; GUERREIRO FILHO, O.; LIMA, M.M. Aspectos genéticos do cafeeiro. **Revista Brasileira de Genética**, [s.l.], v. 14, p. 135-183, 1991.
- CARVALHO, F.G. *et al.* Tolerância ao déficit hídrico em mudas de genótipos de café portadores de genes de diferentes espécies. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 156-163, 2017.
- CASTANHEIRA, D.T. *et al.* Potencial de utilização de características anatômicas e fisiológicas na seleção de progênies de cafeeiro. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 3, p.375-386, 2016.
- DAVIS, A.P. *et al.* Arabica-like flavour in a heat-tolerant wild coffee species. **Nature Plants**, [s.l.], v. 7, n. 4, p. 413-418, 2021.
- DUBBERSTEIN, D. *et al.* Resilient and sensitive key points of the photosynthetic machinery of *Coffea* spp. to the single and superimposed exposure to severe drought and heat stresses. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 11, n. 1049, p. 1-22, 2020.

DURAND, M.; BRENDEL, O.; BURÉ, C.; THIEC, L.T. Altered stomatal dynamics induced by changes in irradiance and vapour-pressure deficit under drought: impacts on the whole-plant transpiration efficiency of poplar genotypes. **New Phytologist**, [s.l.], v. 222, n. 4, p. 1789-1802, 2019.

FERREIRA, D.F. Sisvar: a guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência & Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014.

FREIRE, L.P. *et al.* Análise da expressão do gene manose 6 fosfato redutase em cafeeiros submetidos ao déficit hídrico. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 17-23, 2013.

GRISI, F.A. *et al.* Avaliações anatômicas foliares em mudas de café 'Catuaí' e 'Siriema' submetidas ao estresse hídrico. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 6, p. 1730-1736, 2008.

HASANAGIC, D. *et al.* Long term drought effects on tomato leaves: anatomical, gas exchange and antioxidant modifications. **Acta Physiologiae Plantarum**, [s.l.], v. 42, n. 121, p. 1-14, 2020.

HASANUZZAMAN, M. *et al.* Regulation of ROS metabolism in plants under environmental stress: A review of recent experimental evidence. **Internacional Journal of Molecular Sciences**, [s.l.], v. 21, n. 8695, p. 1-42, 2020.

HASSAN, M.A.E. *et al.* Variability in drought response among the plus tree accessions of *Tectona grandis* (Linn f.) from the provenances of Kerala, South India. **Acta Physiologiae Plantarum**, [s.l.], v. 43, n.47, p. 1-12, 2021.

JOHANSEN, D.A. **Plant microtechnique**. New York: McGraw-Hill, 1940.

KUMAR, D.; TIESZEN, L.L. Photosynthesis in *Coffea Arabica*: I., effects of light and temperature. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 16, p. 13-19, 1980.

LINGLE, T.R. **The coffee cupper's handbook**: a systematic guide to the sensory evaluation of coffee's flavor. Long Beach, CA: Specialty Coffee Association of America, 2011.

MALTA, M.R. *et al.* Discrimination of genotypes coffee by chemical composition of the beans: Potential markers in natural coffees. **Food Research International**, [s.l.], v. 134, n. 109219, p. 1-8, 2020.

MARTINS, S.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**, [s.l.], v. 33, p. 1679-1693, 2019.

MENEZES-SILVA, P.E. *et al.* Photosynthetic and metabolic acclimation to repeated drought events play key roles in drought tolerance in coffee. **Journal of Experimental Botany**, [s.l.], v. 68, n. 15, p.1-14, 2017.

MENGUTAY, M. *et al.* Adequate magnesium nutrition mitigates adverse effects of heat stress on maize and wheat. **Plant Soil**, [s.l.], v. 368, p. 57-72, 2013.

MOAT, J. *et al.* Resilience potencial of the Ethiopian coffee sector under climate change. **Nature Plants**, [s.l.], v. 3, n. 17081, p. 1-14, 2017.

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v. 22, n. 5, p. 867-880, 1981.

NALINA, M. *et al.* Water déficit-induced oxidative stress and differential response in antioxidante enzymes of tolerant and susceptible tea cultivars under field condition. **Acta Physiologiae Plantarum**, [s.l.], v. 43, n. 10, p. 1-17, 2021.

O'BRIEN, T.P.; FEDER, N.; MCCULLY, M.E. Polychromatic staining of plant cell walls by toluidine blue O. **Protoplasma**, Karlsruhe, v. 59, n. 2, 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**, [s.l.], v. 229, p. 226-232, 2018.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B. *et al.* Caracterização da anatomia foliar de cafeeiros arábica em diferentes períodos sazonais. **Revista Biotemas**, Florianópolis, 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: 10 mar. 2021.

REZENDE, R.M. *et al.* Agronomic traits of coffee tree progenies from Timor Hybrid x Catuaí crossing. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, p. 775-780, 2014.

RUIZ-CÁRDENAS, R. **A cafeicultura e sua relação com o clima**. Lavras: HRNS do Brasil, 2015. 23 p.

SILVA, E.A. *et al.* Seasonal changes in vegetative growth and photosynthesis in Arabica coffee trees. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, p. 349-357, 2004.

SACHDEV, S. *et al.* Abiotic stress and reactive oxygen species: generation, signaling, and defense mechanisms. **Antioxidants**, [s.l.], v. 10, n. 277, p. 1-37, 2021.

SALAHVARZI, M. *et al.* Genotype- and tissue-specific physiological and biochemical changes of two chickpea (*Cicer arietinum*) varieties following a rapid dehydration. **Physiologia Plantarum**, [s.l.], v. 172, n. 3, p. 1-13, 2021.

SANTOS, H.G. dos *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SCA. Scaa Cupping Protocols. **Protocolo de degustação de café especial**. Santa Ana, Califórnia: Protocolos SCAA, 2015.

SEGATTO, F.B. *et al.* Técnica para estudo da anatomia da epiderme foliar de batata. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 5, p. 1597-1601, 2004.

SENAR. Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. **Café: cafés especiais**. Serviço Nacional de Aprendizagem Rural, Brasília: SENAR, 2017. 104 p.

SHARMA, P. *et al.* Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of Botany**, [s.l.], v. 2012, n. 217037, p. 1-26, 2012.

SILVA, E.A. *et al.* Seasonal changes in vegetative growth and photosynthesis in Arabica coffee trees. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, p. 349-357, 2004.

SOBREIRA, F.M. *et al.* Potential of Híbrido de Timor germplasm and its derived progenies for coffee quality improvement. **Australian Journal of Crop Science**, [s.l.], v. 9, n. 4, p. 289-295, 2015.

TORRE, F.D. *et al.* Leaf morphophysiological changes induced by long-term drought in *Jatropha curcas* plants explain the resilience to extreme drought. **Journal of Arid Environments**, [s.l.], v. 185, n. 104381, p. 1-8, 2021.

UTHSCSA ImageTool. **Versão 3.0 final**. Disponível em: <http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/download.html>. Acesso em: 03 mar. 2021.

VELIKOVA, V.; YORDANOV, I.; EDREVA, A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous polyamines. **Plant Science**, Clare, v. 151, n. 1, p. 59-66, 2000.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As mudanças climáticas afetam a produtividade das culturas, cada vez mais os estudos buscam minimizar os impactos causados por condições adversas como a seca. Neste sentido, as avaliações morfofisiológicas, anatômicas e bioquímicas auxiliam os programas de melhoramento genético do cafeeiro na identificação precoce de genótipos tolerantes a esse estresse.

O trabalho realizado proporcionou conhecimento dos mecanismos de adaptação de acessos de Híbrido de Timor, material utilizado como fonte de resistência à ferrugem, principal doença da cultura do cafeeiro em condições de casa de vegetação e campo. As informações obtidas auxiliarão desenvolvimento de cultivares tolerantes à seca, que ao mesmo tempo sejam resistentes à ferrugem do cafeeiro, com aspectos produtivos e qualidade de bebida.