

NÚBIA PINTO BRAVIN

The coat of arms of the state of Acre is centered in the background. It features a yellow crown at the top, a shield divided into four quadrants with blue and white colors, and the letters 'U', 'F', 'A', and 'C' in yellow. The shield is flanked by two chains and a red star at the bottom.

**RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS DE CULTIVARES DE CAFEEIROS CANÉFORA
SOB DIFERENTES NÍVEIS DE ÁGUA NO SOLO EM CONDIÇÕES DE CAMPO E
AMBIENTE PROTEGIDO**

RIO BRANCO - AC

2025

NÚBIA PINTO BRAVIN

**RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS DE CULTIVARES DE CAFEEIROS CANÉFORA
SOB DIFERENTES NÍVEIS DE ÁGUA NO SOLO EM CONDIÇÕES DE CAMPO E
AMBIENTE PROTEGIDO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal, Centro de Ciências Biológicas e da Natureza, Universidade Federal do Acre, como parte das exigências para obtenção do título de Doutora em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Marcio de Oliveira Martins

RIO BRANCO - AC

2025

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UFAC

B826r Bravin, Núbia Pinto, 1994 -

Respostas fisiológicas e bioquímicas de cultivares de cafeeiros canéfora sob diferentes níveis de água no solo em condições de campo e ambiente protegido / Núbia Pinto Bravin; orientador: Prof. Dr. Marcio de Oliveira Martins . – 2025.

92 f.:il; 30 cm

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Acre, Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal. Rio Branco, 2025.

Inclui referências bibliográficas.

1. *Coffea canephora*. 2. Robustas amazônicos. 3. Estresse hídrico. I. Martins, Marcio de Oliveira (orientador). II. Título.

CDD: 338.1


NÚBIA PINTO BRAVIN

**RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS DE CULTIVARES DE CAFEEIROS CANÉFORA
SOB DIFERENTES NÍVEIS DE ÁGUA NO SOLO EM CONDIÇÕES DE CAMPO E
AMBIENTE PROTEGIDO**


Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal, Centro de Ciências Biológicas e da Natureza, Universidade Federal do Acre, como parte das exigências para obtenção do título de Doutora em Produção Vegetal.

APROVADA em 28 de fevereiro de 2025.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **MARCIO DE OLIVEIRA MARTINS**
Data: 23/04/2025 13:49:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Dr. Marcio de Oliveira Martins (Presidente)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Documento assinado digitalmente
 **FREDERICO HENRIQUE DA SILVA COSTA**
Data: 24/04/2025 12:14:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Dr. Frederico Henrique da Silva Costa (Membro)
Universidade Federal do Acre - UFAC

Documento assinado digitalmente
 **LEONARDO BARRETO TAVELLA**
Data: 23/04/2025 23:13:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Leonardo Barreto Tavella (Membro)
Universidade Federal do Acre - UFAC

Documento assinado digitalmente
 **JAIRO RAFAEL MACHADO DIAS**
Data: 24/04/2025 10:36:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Jairo Rafael Machado Dias (Membro)
Universidade Federal de Rondônia - UNIR

Documento assinado digitalmente
 **MARCELO CURITIBA ESPINDULA**
Data: 24/04/2025 15:31:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Marcelo Curitiba Espindula (Membro)
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa

Aos meus pais, Manoel Reinaldo Bravin e Rosalice Pereira Pinto Bravin,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Ao meu parceiro, Renato Seidel Jansen, por estar comigo nesta caminhada, por me incentivar e por acreditar em mim quando nem eu mesma acreditava. E ao meu filho, Caio Seidel Bravin, minha maior felicidade, riqueza e herança, que, ao final deste processo, se tornou o sentido de tudo.

À minha família, meus pais, Rosalice Pereira Pinto Bravin e Manoel Reinaldo Bravin, meus irmãos, Maísa Pinto Bravin e Tiago Pinto Bravin, meus cunhados, Leonardo Barreto Tavella, Thiago Seidel Jansen e Thayza Nogueira, minha sogra, Irinéia Seidel, e tantos outros que estiveram comigo, obrigada por toda ajuda, orações, incentivo e apoio.

Aos meus amigos, João Paulo Marin Seim, Andressa Graebin e Marina Conceição do Carmo, por me darem tanta força, por todas as risadas, por acreditarem e me incentivarem.

Ao professor Marcio de Oliveira Martins pela orientação, sugestões e conselhos.

À Universidade Federal do Acre e ao Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal, pela oportunidade e os conhecimentos passados.

À Embrapa Acre, por todo o suporte e disponibilização da área e material experimental.

À CAPES pelo apoio financeiro: O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”.

RESUMO

A cafeicultura tem sido afetada significativamente pelas mudanças climáticas globais. As variações de água no solo influenciam o comportamento das plantas de café e, em condições de baixa disponibilidade hídrica, os cafeeiros ficam suscetíveis a ocorrência de estresse. Na região Amazônica, o déficit hídrico no solo durante o período de estiagem é considerado uma intempérie para o cultivo do cafeeiro canéfora, gerando a necessidade de se desenvolver genótipos que melhor se adaptem à essas condições. Neste sentido, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a fisiologia e bioquímica de cultivares de cafeeiros canéfora sob diferentes níveis de água no solo em condições de campo e ambiente protegido. No capítulo I, em uma revisão de literatura, abordou-se o tema em estudo, passando pelas características da espécie, o efeito do déficit hídrico sobre o cafeeiro, assim como os mecanismos de tolerância dessas plantas. No Capítulo 2, conduziu-se um experimento de campo com o objetivo de avaliar os parâmetros fisiológicos e bioquímicos de cultivares de cafeeiros canéfora sob diferentes tensões de água no solo. Neste estudo, foram avaliadas as combinações de cinco tensões de água no solo (20 kPa, 40 kPa, 60 kPa, 100 kPa e sem irrigação) e seis cultivares de café canéfora (BRS 1216, BRS 2299, BRS 2314, BRS 3210, BRS 3213 e BRS 3220). As tensões foram alocadas como parcelas principais e as cultivares foram alocadas como subparcelas. O experimento foi conduzido em esquema de parcelas subdivididas e o delineamento experimental foi o de blocos casualizados com três repetições. Durante dois anos, as plantas em fase de crescimento (2021) e de produção (2022) foram avaliadas quanto às trocas gasosas, a fluorescência da clorofila-a, dano de membranas, conteúdo relativo de água e teores de pigmentos fotossintéticos e metabólitos. Plantas jovens de canéfora não irrigadas apresentaram menor taxa fotossintética (A) e transpiração (E) aliada à menor condutância estomática (g_s). A eficiência fotoquímica do PSII e os mecanismos de dissipação de energia, com exceção do NPQ, também foi menor na ausência da irrigação. Os teores de carboidratos solúveis se relacionaram negativamente com a fotossíntese. Durante a fase de crescimento, as cultivares BRS 1216 e BRS 3210 apresentaram maior produtividade fotossintética e BRS 2314 a menor. Concluiu-se que o ajuste dos estômatos e da absorção de luz no PSII pela redução da F_v/F_m e dos teores de pigmentos fotossintéticos são importantes mecanismos dos cafeeiros canéforas para redução dos danos causados pelo estresse hídrico, e que as cultivares mantêm desempenho fotossintético sob alta tensão de água no solo, podendo ser cultivados em baixas lâminas de irrigação. No capítulo 3, três destes genótipos foram selecionados e conduzidos em um experimento em condições controladas com o objetivo de avaliar as características fisiológicas e bioquímicas de cultivares de *Coffea canephora* submetidas a diferentes níveis de água no solo. O experimento foi conduzido em esquema fatorial 3×4 composto pela combinação de três cultivares de cafeeiro canéfora, BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210, e quatro níveis de água no solo, 80%, 40% 20% e 10% da capacidade de vaso (CC). Foi utilizado delineamento inteiramente casualizado com 5 repetições. Avaliou-se as trocas gasosas, a fluorescência da clorofila-a, dano de membranas,

conteúdo relativo de água, teores de pigmentos fotossintéticos e metabólitos e alocação de biomassa. A redução do nível de água no solo reduziu progressivamente a A , gS , E , $\Phi PSII$, Fv/Fm , CRA , e a MS , entretanto, após 35 dias, os tratamentos de 20% e 10% não diferiram entre si. Não houve variação nos teores de pigmentos fotossintéticos. A concentração de *Prolina* e *Chla/Chlb* foram aumentadas sob estresse hídrico severo. Constatou-se que as cultivares são semelhantes quanto a capacidade de lidar com o estresse hídrico e que a redução da gS em mudas de *Coffea canephora* cultivadas a 40% da CC é um mecanismo chave para evitar a perda de água nessas plantas, sendo capazes de manter o CRA e a taxa fotossintética, e evitar o DM . A cultivar BRS 2314 tem menor acúmulo total de biomassa, porém, maior relação R/Pa , podendo ser indicada para o cultivo em condição de déficit hídrico.

Palavras-chave: *Coffea canephora*; Robustas Amazônicas; Estresse hídrico; Irrigação; Trocas gasosas

ABSTRACT

Coffee growing has been significantly affected by global climate change. Variations in soil water levels influence the behavior of coffee plants, and in conditions of low water availability, coffee plants are susceptible to stress. In the Amazon region, soil water deficit during the dry season is considered a poor weather for the cultivation of robusta coffee plants, generating the need to develop genotypes that are better adapted to these conditions. In this sense, this study was carried out with the objective of evaluating the physiology and biochemistry of *Coffea canephora* cultivars under different soil water levels in field and protected environments. In Chapter I, a literature review was conducted to address the topic under study, going through the characteristics of the species, the effect of water deficit on coffee plants, as well as the tolerance mechanisms of these plants. In Chapter 2, a field experiment was conducted with the objective of evaluating the physiological and biochemical parameters of robusta coffee cultivars under different soil water tensions. Two-year-old plants were evaluated in a randomized block design, in a split-plot scheme. Combinations of five soil water tensions (20 kPa, 40 kPa, 60 kPa, 100 kPa and without irrigation) and six robusta coffee cultivars (BRS 1216, BRS 2299, BRS 2314, BRS 3210, BRS 3213 and BRS 3220) were allocated as main plots and subplots, respectively. During two years, plants in the growth (2021) and production (2022) phases were evaluated for gas exchange, chlorophyll-a fluorescence, membrane damage, relative water content and concentration of photosynthetic pigment and metabolite. Young non-irrigated coffee plants showed lower photosynthetic rate (A) and transpiration (E) combined with lower stomatal conductance (g_s). The photochemical efficiency of PSII and the energy dissipation mechanisms, with the exception of NPQ, were also lower in the absence of irrigation. Soluble carbohydrate contents were negatively related to photosynthesis. During the growth phase, cultivars BRS 1216 and BRS 3210 showed higher photosynthetic productivity and BRS 2314 the lowest. It was concluded that the adjustment of stomata and light absorption in PSII by reducing F_v/F_m and photosynthetic pigment contents proved to be important mechanisms of robusta coffee plants to reduce damage caused by water stress, and that the cultivars maintain photosynthetic performance under high soil water tension, and can be grown at low irrigation levels. In Chapter 3, three of these genotypes were selected and conducted in an experiment under controlled conditions with the objective of evaluating the physiological and biochemical characteristics of *Coffea canephora* cultivars subjected to different soil water levels. The experiment was conducted in a completely randomized design, with a 3 x 4 factorial scheme, and 5 replications. The treatments involved three cultivars of robusta coffee, BRS 1216, BRS 2314 and BRS 3210, and four soil water levels, 80%, 40% 20% and 10% of the pot capacity (CC). Gas exchange, chlorophyll-a fluorescence, membrane damage, relative water content, photosynthetic pigment and metabolite contents and biomass allocation were evaluated. The reduction in soil water level progressively reduced A , g_s , E , Φ_{PSII} , F_v/F_m , WRC, and MD; however, after 35 days, the 20% and 10% treatments did not differ from each other. There was no

variation in the photosynthetic pigment contents. The concentrations of *Pro* and *Chla/Chlb* were increased under severe water stress. It was found that the cultivars are similar in their ability to cope with water stress and that the reduction in *gS* in *Coffea canephora* seedlings grown at 40% of WHC is a key mechanism to prevent water loss in these plants, being able to maintain *WRC* and photosynthetic rate, and avoid *MD*. The cultivar BRS 2314 has a lower total biomass accumulation, but a higher *R/Pa* ratio, and may be indicated for cultivation under water deficit conditions.

Keywords: *Coffea canephora*; Robustas Amazônicos; Water stress; Irrigation; Gas exchange

LISTA DE FIGURAS

Capítulo II

Figura 1 -	Precipitação mensal, umidade relativa do ar (URar) e temperatura do ar máxima e mínima durante o período experimental	39
Figura 2 -	Taxa fotossintética (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E), concentração interna de CO_2 (C_i), eficiência do uso da água (EUA) e eficiência de carboxilação (EC) em cultivares de <i>Coffea canephora</i> cultivadas sob tensões de água no solo de 20, 40, 60 e 100 kPa e sem irrigação (NI), nos anos de 2021 e 2022	43
Figura 3 -	Eficiência quântica potencial do PSII (F_v/F_m), eficiência quântica operacional do PSII (Φ_{PSII}), coeficiente de extinção fotoquímica (q_P), coeficiente de extinção não-fotoquímica (NPQ), taxa de transporte de elétrons (ETR) e excesso de energia (ExC) em cultivares de <i>Coffea canephora</i> cultivadas sob tensões de água no solo de 20, 40, 60 e 100 kPa e sem irrigação (NI), nos anos de 2021 e 2022	45
Figura 4 -	Teores de Clorofila-a (Chl_a), Clorofila-b (Chl_b), clorofila total (Chl_{total}), relação clorofila a/b ($Chl\ a/b$) e carotenoides (Car), em cultivares de <i>Coffea canephora</i> cultivadas sob tensões de água no solo de 20, 40, 60 e 100 kPa e sem irrigação (NI), nos anos de 2021 e 2022	46
Figura 5 -	Conteúdo relativo de água (CRA) e dano de membrana (DM) em cultivares de <i>Coffea canephora</i> cultivadas sob tensões de água no solo de 20, 40, 60 e 100 kPa e sem irrigação (NI), nos anos de 2021 e 2022	47
Figura 6 -	Teores de carboidratos solúveis totais (CST), amido, aminoácido solúveis totais (AST) e prolina (Pro) em cultivares de <i>Coffea canephora</i> cultivadas sob tensões de água no solo de 20, 40, 60 e 100 kPa e sem irrigação (NI), nos anos de 2021 e 2022	48
Figura 7 -	Análise de Componentes Principais para a relação entre trocas gasosas, fluorescência da clorofila-a e teores de pigmentos fotossintéticos e metabólitos de cultivares de <i>Coffea canephora</i> cultivadas sob diferentes tensões de água no solo, nos anos de 2021 (A1 e A2) e 2022 (B1 e B2)	51

Capítulo III

Figura 1 -	Umidade relativa do ar (URar) e temperatura do ar máxima e mínima durante o período experimental	63
Figura 2 -	Taxa fotossintética (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E), concentração interna de CO_2 (C_i), eficiência do uso da água (EUA) e eficiência de carboxilação (EC) em cultivares de <i>Coffea canephora</i> , BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210, cultivadas à 80%, 40%, 20% e 10% da capacidade de vaso	68
Figura 3 -	Eficiência quântica potencial do PSII (F_v/F_m), eficiência quântica operacional do PSII (Φ_{PSII}), coeficiente de extinção fotoquímica (q_P), coeficiente de extinção não-fotoquímica (NPQ), e taxa de transporte de elétrons (ETR) em cultivares de <i>Coffea canephora</i> , BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210, cultivadas à 80%, 40%, 20% e 10% da capacidade de vaso	70

Figura 4 -	Teores de Clorofila-a (Chl_a), Clorofila-b (Chl_b), clorofila total (Chl_{total}), relação clorofila a/b ($Chl\ a/b$) e carotenoides (Car) em cultivares de <i>Coffea canephora</i> , BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210, cultivadas à 80%, 40%, 20% e 10% da capacidade de vaso	72
Figura 5 -	Teores de carboidratos solúveis totais (CST), aminoácido solúveis totais (AST) e prolina (Pro) em cultivares de <i>Coffea canephora</i> , BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210, cultivadas à 80%, 40%, 20% e 10% da capacidade de vaso	72
Figura 6 -	Conteúdo relativo de água (CRA) e dano de membrana (DM) em cultivares de <i>Coffea canephora</i> , BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210, cultivadas à 80%, 40%, 20% e 10% da capacidade de vaso	73
Figura 7 -	Massa seca do caule (MS_{caule}), massa seca da folha (MS_{folha}), massa seca da raiz (MS_{raiz}) e massa seca total (MS_{total}) em cultivares de <i>Coffea canephora</i> , BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210, cultivadas à 80%, 40%, 20% e 10% da capacidade de vaso	74
Figura 8 -	Alocação de biomassa no caule (AB_{caule}), folha (AB_{folha}), e raiz (AB_{raiz}) e relação raiz/parte aérea (R/Pa) em cultivares de <i>Coffea canephora</i> , BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210, cultivadas à 80%, 40%, 20% e 10% da capacidade de vaso	75
Figura 9	Análise de Componentes Principais para a relação entre trocas gasosas, fluorescência da clorofila-a e teores de pigmentos fotossintéticos, metabólitos e crescimento de cultivares de <i>Coffea canephora</i> cultivadas à 80%, 40%, 20% e 10% da capacidade de vaso	76

LISTA DE TABELAS

Capítulo II

Tabela 1 -	Valores médios de fotossíntese (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E), concentração interna de CO_2 (C_i), eficiência do uso da água (EUA), eficiência de carboxilação (EC), eficiência quântica potencial do PSII (F_v/F_m), eficiência quântica operacional do PSII (Φ_{PSII}), coeficiente de extinção fotoquímica (qP), coeficiente de extinção não-fotoquímica (NPQ), taxa de transporte de elétrons (ETR) e excesso de energia (ExC) de cultivares de <i>Coffea canephora</i> , nos anos de 2021 e 2022.	44
Tabela 2 -	Valores médios dos teores de Clorofila-a (Chl_a), Clorofila-b (Chl_b), clorofila _{total} (Chl_{total}), relação clorofila a/b ($Chl\ a/b$), carotenoides (Car), dano de membrana (DM), conteúdo relativo de água (CRA), carboidratos solúveis totais (CST), aminoácidos solúveis totais (AST) e prolina (Pro) em clones de <i>Coffea canephora</i> , nos anos de 2021 e 2022	41
Tabela S1	Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis de fotossíntese e fluorescência de clones de <i>Coffea canephora</i> cultivados sob diferentes tensões de água no solo	57
Tabela S2	Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis fisiológicas e bioquímicas de clones de <i>Coffea canephora</i> cultivados sob diferentes tensões de água no solo	58

Capítulo III

Tabela 1 -	Taxa fotossintética (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E), concentração interna de CO_2 (C_i), eficiência do uso da água (EUA) e eficiência de carboxilação (EC) em cultivares de <i>Coffea canephora</i> BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210	69
Tabela 2 -	Eficiência quântica máxima do PSII (F_v/F_m), eficiência quântica operacional do PSII (Φ_{PSII}), coeficiente de extinção fotoquímica (qP), coeficiente de extinção não-fotoquímica (NPQ) e taxa de transporte de elétrons (ETR) em cultivares de <i>Coffea canephora</i> , BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210	71
Tabela 3 -	Valores médias de massa seca do caule (MS_{caule}), massa seca da folha (MS_{folha}), massa seca da raiz (MS_{raiz}), massa seca total (MS_{total}), alocação de biomassa no caule (AB_{caule}), alocação de biomassa na folha (AB_{folha}), alocação de biomassa na raiz (AB_{raiz}), relação raiz/parte aérea (R/Pa), teores de clorofila-a (Chl_a), clorofila-b (Chl_b), clorofila total (Chl_{total}), relação clorofila a/b ($Chl\ a/b$), carotenoides (Car), carboidratos solúveis totais (CST), aminoácido solúveis totais (AST), prolina (Pro), conteúdo relativo de água (CRA) e dano de membrana (DM) em cultivares de <i>Coffea canephora</i> , BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210	73

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Assimilação de CO ₂
AB	Alocação de biomassa
ABA	Ácido abscísico
APX	Ascorbato peroxidase
AST	Aminoácido solúveis totais
Car	Carotenoides
CAT	Catalase
Chl_a	Clorofila-a
Chl_b	Clorofila-b
Chl_{total}	Clorofila total
Chl a/b	Relação clorofila a/b
Ci	Pressão parcial de CO ₂
CRA	Conteúdo relativo de água
CST	Carboidratos solúveis totais
DM	Dano de Membrana
DPV	Déficit de pressão de vapor
E	Transpiração
EC	Eficiência de carboxilação
EROs	Espécies reativas de oxigênio
EUA	Eficiência de uso da água
ExC	Excesso de energia
ETR	Taxa de transporte de elétrons
Fv/Fm	Eficiência quântica potencial do fotossistema II
gS	Condutância estomática
kPa	Kilopascal
MS	Massa seca
Mpa	Megapascal
NPQ	Coefficiente de extinção não fotoquímica
PCA	Análise de componentes principais
Pro	Prolina
PSII	Fotossistema II
qP	Coefficiente de extinção fotoquímica
R/Pa	Relação raiz/parte aérea
SOD	Superóxido dismutase
ΦPSII	Eficiência quântica operacional do fotossistema II
Ψ_w	Potencial hídrico

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
------------------	----

CAPÍTULO I - REVISÃO DE LITERATURA

1 REVISÃO DE LITERATURA	18
1.1 Aspectos gerais de <i>Coffea canéfora</i>	18
1.2 Robustas Amazônicas	19
1.3 Cafeicultura no Acre	21
1.4 Irrigação de cafezais	21
1.5 Alterações fisiológicas e bioquímicas em plantas sob estresse hídrico	22
1.6 Mecanismos de tolerância ao estresse hídrico	24
1.7 Estresse hídrico em cafeeiro	26
REFERÊNCIAS	28

CAPÍTULO II - FISIOLOGIA E BIOQUÍMICA DE CAFEEIROS CANÉFORA EM FUNÇÃO DE DIFERENTES TENSÕES DE ÁGUA NO SOLO EM CONDIÇÕES DE CAMPO

1 INTRODUÇÃO	35
2 MATERIAL E MÉTODOS	37
2.1 Descrição do local e material vegetal	37
2.2 Design Experimental	38
2.3 Manejo da Irrigação	38
2.4 Amostragem e Avaliações	39
2.4.1 Trocas gasosas	39
2.4.2 Fluorescência da Clorofila-a	39
2.4.3 Pigmentos Fotossintéticos	40
2.4.4 Conteúdo Relativo de Água e Dano de Membrana	40
2.4.5 Metabólitos	41
2.5 Análises Estatísticas	41
3 RESULTADOS	42

3.1 Trocas gasosas	42
3.2 Fluorescência da Clorofila-a	42
3.3 Pigmentos Fotossintéticos	43
3.4 Conteúdo Relativo de Água e Dano de Membrana	45
3.5 Metabólitos	46
4 DISCUSSÃO	47
5 CONCLUSÕES	52
REFERÊNCIAS	53

CAPÍTULO III - CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS, BIOQUÍMICAS E DE CRESCIMENTO DE CAFEEIROS CANÉFORA SOB DIFERENTES NÍVEIS DE ÁGUA NO SOLO

1 INTRODUÇÃO	60
2 MATERIAL E MÉTODOS	62
2.1 Condições de cultivo e material vegetal	62
2.2 Tratamentos e delineamento experimental	63
2.3 Manejo da Irrigação	63
2.4 Amostragem e Avaliações	63
2.4.1 Trocas gasosas	64
2.4.2 Fluorescência da Clorofila-a	64
2.4.3 Pigmentos Fotossintéticos	64
2.4.4 Conteúdo Relativo de Água e Dano de Membrana	65
2.4.5 Metabólitos	65
2.4.6 Matéria Seca e alocação de biomassa	66
2.5 Análises Estatísticas	66
3 RESULTADOS	66
3.1 Trocas gasosas	66
3.2 Fluorescência da Clorofila-a	68
3.3 Pigmentos Fotossintéticos	70
3.4 Metabólitos	71
3.5 Conteúdo Relativo de Água e Dano de Membrana	72

3.6 Crescimento	73
4 DISCUSSÃO	76
5 CONCLUSÕES	79
REFERÊNCIAS	79
CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
REFERÊNCIAS	88

INTRODUÇÃO

O cafeeiro é uma planta originária do continente Africano, porém, sua bebida é apreciada no mundo inteiro. Há pelo menos 124 espécies classificadas no gênero *Coffea*, mas apenas *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* Pierre ex Froenher têm maior importância comercial (DAVIS *et al.*, 2011).

No Brasil, a cafeicultura exerce um papel essencial no setor agropecuário. O país é o maior produtor e exportador mundial da cultura (OIC, 2024), produzindo anualmente mais de 60 milhões de sacas de café (CONAB, 2025). Deste total produzido, 30% corresponde à espécie *C. canephora*, popularmente conhecido como café conilon, café robusta ou café canéfora (TADEU *et al.*, 2024).

Na região amazônica, onde predomina o cultivo de *C. canephora*, a cultura representa importante papel socioeconômico em razão de sua expressiva influência na agricultura familiar e na economia local (OLIVEIRA e ARAÚJO, 2015). A área cultivada por café na Amazônia é de aproximadamente 67 mil hectares, com uma produção anual em torno de 2,4 milhões de sacas de café beneficiado (CONAB, 2025). As lavouras de café na região são compostas por plantas híbridas obtidas por cruzamentos naturais e cruzamentos dirigidos entre as variedades botânicas conilon e robusta, resultando em uma variedade popularmente denominada como Robustas Amazônicos (ROCHA *et al.*, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2018). Esses materiais apresentam diversidade genética, combinando características desejáveis como alta produtividade, resistência a pragas e doenças, entre outros fatores, sendo adaptadas às condições ambientais do oeste da Amazônia brasileira (CUSTÓDIO, 2022; TADEU *et al.*, 2024). Embora as condições edafoclimáticas serem favoráveis para seu plantio e condução, a capacidade produtiva das lavouras de Robustas Amazônicos vem sendo afetada pela ocorrência de eventos climáticos extremos (TEIXEIRA *et al.*, 2020). No período de estiagem na região Amazônica (entre junho e setembro) o déficit hídrico fica superior a 200 mm, condição limitante para o cultivo da espécie. O estresse hídrico é ainda potencializado pela combinação de altas temperaturas e um incremento significativo do DPV (SILVA *et al.*, 2015), o que ocorre neste período na região (MARCOLAN *et al.*, 2009; INMET, 2023).

O cafeeiro é fortemente influenciado pelas condições em que é cultivado e as variáveis ambientais como temperatura, umidade relativa e disponibilidade hídrica afetam seu comportamento vegetativo e produtivo (CHEKOL *et al.*, 2024). De modo geral, a seca e as temperaturas desfavoráveis são as principais limitações à produção do cafeeiro (CHESEREK e GICHIMU, 2012). Segundo Marcolan *et al.* (2009) a distribuição anual das precipitações e a ocorrência e severidade do déficit hídrico estão entre as variáveis climáticas que mais afetam as diferentes fases fenológicas da cafeicultura.

Sob condição de baixa disponibilidade hídrica, a condutância estomática das plantas de café é significativamente reduzida (BONOMO *et al.*, 2016; TOUNEKTI *et al.*, 2018), afetando sua taxa fotossintética, o crescimento e a produtividade (DEUNER *et al.*, 2011; CHESEREK e GICHIMU, 2012). Quando as plantas são expostas a condições de seca, outros componentes do processo

fotossintético são também afetados. A bioquímica de fixação de CO₂ também é comprometida pela queda na eficiência e da atividade das enzimas essenciais ao metabolismo fotossintético das plantas (BERTOLLI *et al.*, 2012; SOUROUR *et al.*, 2017; CHEKOL *et al.*, 2024). Segundo Santos *et al.* (2014), o estresse hídrico moderado a severo prejudica a eficiência de absorção da luz pela inibição da biossíntese de clorofila. Sob condições de estresse, como de restrição hídrica, ocorre mudanças nos componentes de produção de espécies reativas de oxigênio, induzindo seu acúmulo e, conseqüentemente, a atividade tóxica dessas moléculas (GILL e TUTEJA, 2010; SCHNEIDER *et al.*, 2019).

As plantas possuem estratégias para eliminar ou diminuir os impactos do estresse hídrico. Os mecanismos de resistência ou tolerância envolve mudanças na fisiologia, morfologia e na bioquímica celular. Estes incluem a manutenção do teor de água na célula a partir do acúmulo de solutos compatíveis (SCHNEIDER *et al.*, 2019), aumento da atividade de enzimas antioxidantes (GILL e TUTEJA, 2010), acúmulo de ácido abscísico (ABA) (MELO *et al.*, 2020) e mudanças na morfologia da planta (SHAO *et al.*, 2008). Tais mecanismos regulam a eficiência do uso da água e conseqüente acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), manutenção da clorofila e sobrevivência das plantas (MELO *et al.*, 2020).

Em cafeeiros, o fechamento dos estômatos aos primeiros sinais de restrição hídrica é uma das primeiras estratégias para minimizar os danos por desidratação (DEUNER *et al.*, 2011; CHEKOL *et al.*, 2024). Esse significativo fechamento estomático deve-se à sua baixa condutividade hidráulica, que responde rapidamente à redução do potencial hídrico foliar (DEUNER *et al.*, 2011; CHESEREK e GICHIMU, 2012; BONOMO *et al.*, 2016; TOUNEKTİ *et al.*, 2018). Tal mecanismo é ainda importante para evitar maiores danos no fotossistema II relacionados ao déficit de água (THIOUNE *et al.*, 2017). A redução da produtividade sob condições de déficit hídrico pode variar de 10% em genótipos tolerantes e em até 90% em genótipos sensíveis e, a magnitude desse processo vai depender da intensidade e duração em que o déficit é imposto (BONOMO *et al.*, 2016).

As alterações morfológicas e bioquímicas observadas em *Coffea canephora* sob condições de déficit hídrico representam estratégias adaptativas que conferem maior resistência a ambientes com baixa disponibilidade hídrica. No entanto, o impacto do estresse hídrico sobre a produtividade e a qualidade dos grãos destaca a importância do manejo adequado da irrigação e de práticas agrônômicas que minimizem os efeitos desse estresse. O cultivo irrigado tem sido uma importante estratégia para a melhoria da produção agrícola. Mesmo em regiões consideradas aptas ao cultivo do cafeeiro canéfora, o uso dessa técnica é justificável, visto que elimina os riscos decorrentes de secas ocasionais, além de garantir maior vigor vegetativo e produtividade (BONOMO *et al.*, 2014).

O conhecimento sobre a fisiologia do café canéfora cultivado na Amazônia é escasso. As poucas informações disponíveis não destrincham os mecanismos fisiológicos que explicariam esses processos, sobretudo, em função dos diferentes genótipos, ambientes e condições de cultivo encontradas na região. Neste trabalho, trouxemos uma abordagem fisiológica e bioquímica de alguns desses materiais de alto potencial produtivo na região, ao passo que se busca trazer respostas sobre seu comportamento em diferentes disponibilidades hídrica, tanto em condição de campo, como em ambiente protegido. Em um

primeiro capítulo, os aspectos relacionados à espécie, cultivo na região e sua relação com o estresse hídrico foram apresentados em uma revisão de literatura. No segundo capítulo, avaliamos os parâmetros fisiológicos e bioquímicos de seis cultivares de cafeeiros Robustas Amazônicos cultivados em diferentes tensões de água no solo. Plantas em fase juvenil e produtiva foram avaliadas em condições de campo durante dois anos consecutivos. E, no terceiro capítulo, três dessas cultivares foram selecionadas e seu desempenho fisiológico, bioquímico e de crescimento em função de diferentes níveis de água no solo foram avaliados em um experimento em casa de vegetação. Os resultados mostraram um perfil fisiológico característico desses materiais quando submetido à restrição hídrica e seus principais mecanismo de proteção para lidarem com o estresse.

CAPÍTULO I
REVISÃO DE LITERATURA

1 REVISÃO DE LITERATURA

1.1 ASPECTOS GERAIS DE *Coffea canephora*

O cafeeiro é uma planta pertencente à família Rubiaceae, tribo *Coffeae* e gênero *Coffea* L. Existem pelos menos 124 espécies classificadas no gênero *Coffea*. Dessas, apenas *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* Pierre ex Froenher são exploradas comercialmente a nível mundial em maior proporção, 60% e 40%, respectivamente (MUSOLI *et al.*, 2009; DAVIS *et al.*, 2011). Ambas são amplamente difundidas no Brasil, com uma produção total equivalente a 55,1 milhões de sacas de 60 kg anualmente. A espécie *C. canephora* corresponde a 38,9% do café produzido e o *C. arábica* 70,6% (CONAB, 2025).

O *C. canephora* é originário de uma ampla área do continente Africano, que se estende costa oeste à região central do continente (região da Guiné ao Congo). Essas áreas baixas de floresta tropical são caracterizadas pelo clima úmido, com temperaturas médias em torno de 21°C nos meses mais frios e de 30°C nos meses quentes, e precipitação superior a 2.000 mm ao ano, bem distribuída, com uma estação seca de dois a três meses (COSTE, 1992; FERRÃO *et al.*, 2017).

O primeiro cultivo comercial de *C. canephora* foi registrado no Congo, em 1870, e, pouco depois, a planta foi cultivada em larga escala na região de Madagascar. Sua resistência à ferrugem permitiu um rápido sucesso e expansão na Indonésia, entre 1880 e 1905, além de outras regiões da África, Ásia e América, com destaque para o Brasil. A introdução no Brasil ocorreu pelo estado do Espírito Santo, em 1912. A espécie se expandiu principalmente nas áreas abaixo de 450 m de altitude, consideradas marginais ao cultivo do *C. arabica*. Porém, apenas 70 anos depois é que foram registradas as primeiras produções em grande escala no país (FONSECA *et al.*, 2015; FERRÃO *et al.*, 2017).

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de *C. canephora*, estando atrás apenas do Vietnã. No país, a produção se concentra nos estados do Espírito Santo (65,6% da produção), Rondônia (16,7%) e Bahia (13,0%). A produção nacional é de aproximadamente 15,2 milhões de sacas de café beneficiado anualmente (CONAB, 2025).

A espécie é diploide ($2n = 2x = 22$ cromossomos), estritamente alógama, apresentando autoincompatibilidade do tipo gametofítica. No Brasil, o *C. canephora* é representado por dois grupos varietais, os genótipos do tipo ‘Conilon’, com plantas menores, com mais tolerância à seca e menor resistência à ferrugem; e os genótipos do tipo ‘Robusta’, que são plantas mais vigorosas, com melhor qualidade de bebida, maior sensibilidade à seca e maior resistência à ferrugem (MUSOLI *et al.*, 2009; FERRÃO *et al.*, 2017). Por apresentar fecundação cruzada, diferente do *C. arabica*, suas populações naturais exibem expressiva variabilidade genética, com indivíduos altamente heterozigóticos, e, nas populações resultantes do inter cruzamento dos dois grupos, se observam indivíduos com fenótipos intermediários, dificultando sua caracterização (SOUZA *et al.*, 2015).

No Brasil, os cafés da espécie *C. canephora* são conhecidos como café Conilon, o contrário de outros países, que usa o termo Robusta para se referir à espécie. Isso se deve à influência do estado do Espírito Santo, que produz em sua totalidade materiais do grupo varietal conilon (FERRÃO *et al.*, 2017). Todavia, a partir de estudos de marcadores genéticos realizados pela Embrapa-RO e parceiros, foi constatado que as lavouras cafeeiras da região Amazônica são constituídas de materiais robustas ou “arrobustados” (híbrido provindos de cruzamentos das variedades conilon e robusta, com predominância deste último) (SOUZA *et al.*, 2015). Devido a isso, o termo “café canéfora” (que abrange os dois grupos varietais) vem sendo utilizado para se referir aos materiais cultivados na região, um paralelo ao que ocorre com *C. arabica*, que é popularmente chamada de “café arábica” (RESENDE e BARBOSA, 2005).

O café canéfora é cultivado em regiões com menor altitude, abaixo de 800 m, e temperatura mais elevada, com média anual de 22° a 26°C. Apresenta maior tolerância a curtos períodos de seca que as cultivares de arábica, com aptidão hídrica para regiões com déficit anual de 150 mm a 200 mm (DaMATTA e RAMALHO, 2006; RONCHI e DaMATTA, 2017). As taxas fotossintéticas do cafeeiro são relativamente baixas, com valores máximos em torno de 11-12 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para folhas isoladas, em razão de uma alta resistência à difusão do CO_2 , tanto em níveis de estômato como de mesófilo (RONCHI e DaMATTA, 2017). Na região Amazônica as lavouras de café são, em sua totalidade, compostas por plantas da espécie *C. canephora*, sendo favorecidas pela boa adaptação às áreas de cultivos da região (SOUZA *et al.*, 2015). Nas condições edáficas, climáticas e socioeconômicas da região Amazônica, devido às características genéticas favoráveis, esses genótipos, tanto em condições de sequeiro ou com irrigação complementar, continuam sendo uma boa opção para formação de cafezais (OLIVEIRA e ARAUJO, 2015).

1.2 ROBUSTAS AMAZÔNICOS

Os cafés Robustas Amazônicos (*Coffea canephora*), genótipos de cafeeiros cultivados na região amazônica, são híbridos obtidos por cruzamentos naturais e cruzamentos dirigidos entre as variedades botânicas conilon e robusta (ROCHA *et al.*, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2018).

Os clones, selecionados empiricamente pelos cafeicultores, juntamente com as cultivares registradas pela Embrapa, constituem atualmente o conjunto de materiais genéticos cultivados na região. Por meio de técnicas de melhoramento genético e identificação de características superiores nos genótipos, foi possível desenvolver tais híbridos, permitindo a seleção de plantas-matrizes, formação de populações e melhoria contínua por meio da seleção recorrente. Esses materiais apresentam diversidade genética, com distintas características físicas e químicas dos frutos e grãos (LOPES JUNIOR *et al.*, 2023).

Para ampliar a variabilidade genética da cafeicultura na Amazônia Ocidental e proporcionar novas alternativas de cultivo, a Embrapa Rondônia desenvolveu 10 cultivares de cafés Robustas Amazônicos com elevado potencial produtivo e características agronômicas adequadas. As novas

cultivares foram resultantes de cruzamentos entre as variedades botânicas Conilon e Robusta a partir de hibridações controladas entre plantas matrizes presentes no Banco Ativo de Germoplasma da Embrapa (TEIXEIRA *et al.*, 2020). As plantas foram desenvolvidas com o objetivo de combinar características desejáveis como alta produtividade, resistência a pragas e doenças, qualidade diferenciada da bebida, entre outros fatores, sendo adaptadas às condições ambientais do oeste da Amazônia brasileira (TEIXEIRA *et al.*, 2020; TADEU *et al.*, 2024).

O aumento na quantidade e qualidade nos sistemas produtivos de café na região amazônica vem ocorrendo graças a introdução de lavouras propagadas vegetativamente de plantas matrizes com características desejáveis atrelado a um pacote tecnológico (podas, adubação, irrigação e novos arranjos espaciais) (LOPES JUNIOR *et al.*, 2023). Avaliando a interação genótipo x ambiente em ensaios de competição clonal de Robustas, Lourenço *et al.* (2022) concluíram que o uso de tecnologias, como irrigação, pode potencializar o desempenho de clones superiores e reduzir perdas associadas ao déficit hídrico, especialmente no período de enchimento dos frutos. Além disso, fatores ambientais como saturação de base do solo influenciam o desenvolvimento das plantas e solos com maior fertilidade natural favorecem o rendimento mesmo sob condições de sequeiro.

As cultivares de Robustas Amazônicas ajustam a abertura estomática para reduzir as perdas de água sem comprometer significativamente a fotossíntese. Este processo ocorre de forma coordenada com a manutenção da integridade celular e redução no acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS), favorecendo a manutenção da atividade metabólica (SCHMIDT *et al.*, 2023). O ajuste das taxas fotossintéticas ocorre também através da regulação da eficiência no uso de luz, mecanismos fundamentais para garantir a produção de biomassa em ambientes com déficit hídrico (CUSTÓDIO, 2022; SCHMIDT *et al.*, 2023).

A capacidade de desenvolvimento de raízes profundas e ramificadas dos genótipos permite a extração de água de camadas mais profundas do solo durante períodos de déficit hídrico. A estrutura radicular eficiente é fundamental para garantir o fornecimento de água e nutrientes, reduzindo os impactos do estresse hídrico (GIURIATTO JUNIOR *et al.*, 2020). Há indicativo de que cultivares de *C. canephora* acumulam maiores concentrações de cafeína e ácidos clorogênicos em resposta ao estresse hídrico (TADEU *et al.*, 2024). A cafeína atua como um composto de defesa, contribuindo para a tolerância ao estresse e resistência a patógenos, enquanto os ácidos clorogênicos têm papel antioxidante e osmoprotetor.

A adaptabilidade fisiológica dos Robustas Amazônicos ao déficit hídrico permite maior estabilidade produtiva em áreas com riscos de veranicos e mudanças no regime de chuvas. Segundo Teixeira *et al.* (2020) o manejo eficiente dessas cultivares pode contribuir para a redução de custos com irrigação; aumento da eficiência no uso de recursos hídricos; manutenção da qualidade dos grãos, com teores de compostos bioativos relevantes para a indústria de cafés especiais. A plasticidade fisiológica e os mecanismos bioquímicos de ajuste tornam os Robustas Amazônicos uma alternativa promissora para

regiões sujeitas ao déficit hídrico, além de contribuir para a produção sustentável e a oferta de cafês de qualidade com atributos bioquímicos diferenciados.

1.3 CAFEICULTURA NO ACRE

O Acre é o segundo maior produtor de café da região Norte do país, estando atrás apenas do estado de Rondônia. Apesar dessa posição, o cultivo de café no estado ainda é incipiente e o baixo nível tecnológico se faz presente. A produção anual de café no Acre é de aproximadamente 34 mil sacas, o que representa apenas 1,3% do total produzido na região (IBGE, 2023). De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, a produtividade do estado, avaliada em 2023, foi de 29 sc/ha, 78% menor que o principal produtor da região.

A capacidade produtiva das lavouras de café do estado é limitada pelo baixo padrão tecnológico predominante na atividade. Nesses sistemas, há deficiência de tratos culturais como desbrota, poda e adubação, assim como métodos inadequados de colheita e pós-colheita. A cafeicultura acreana é caracterizada pela pequena produção familiar. Estima-se que 93% das lavouras possuam menos de 5 ha e 55% menos de 2 ha. A atividade é exercida principalmente pelos pequenos agricultores, o que lhe confere grande importância econômica e social (OLIVEIRA e ARAÚJO, 2015). O município de Acrelândia é o principal produtor, respondendo por mais de 55% da produção total de grãos no estado (IBGE, 2023).

As condições edafoclimáticas do estado são favoráveis para o plantio do café canéfora. A região apresenta altas temperaturas (média de 24,5°C), elevados índices de precipitação pluviométrica, em torno de 2.100 mm por ano e com uma estação seca de pequena duração e bem definida (junho a setembro) (AGRITEMPO, 2021). O solo apresenta diversidade de aptidão para a produção de café, destacando o melhor desempenho para as regiões do Baixo Acre (porção leste), Regional Tarauacá-Envira e Purus (porção central) e Juruá (extremo oeste), recomendadas para o cultivo da cultura (ARAÚJO *et al.*, 2018).

Grças às iniciativas do governo estadual, em parceria com instituições de pesquisa e extensão, a cafeicultura no Acre vem passando por um processo de expansão e renovação. O crescimento previsto baseia-se no incentivo à ampliação da área cultivada e no aumento da produção e produtividade, impulsionados pela introdução de novas cultivares melhoradas com alto potencial produtivo. Nesse contexto, o uso de variedades clonais, aliado à adoção de práticas culturais que maximizam o potencial dessas plantas, como podas, desbrota, adubação e irrigação complementar, é essencial (SÁ *et al.*, 2018).

1.4 IRRIGAÇÃO DE CAFEZAIS

A irrigação é uma ferramenta crucial para otimizar a produção de alimentos globalmente. Ela tem sido utilizada como uma alternativa para reduzir o estresse hídrico, resultando em aumentos

significativos na produção e rentabilidade das propriedades (CARARO e DIAS, 2015; SILVA e REIS, 2017). O uso da irrigação na cafeicultura tem aumentado nas últimas décadas, resultado da expansão da cultura para áreas com restrição hídrica e da variabilidade climática observada nas regiões produtoras (CARARO e DIAS, 2015). No Brasil, estima-se que aproximadamente 10% a 15% da área total cultivada com café utiliza sistemas de irrigação, com destaque para as regiões do Cerrado Mineiro (MG), Oeste da Bahia e regiões de conilon no Espírito Santo e Rondônia (CONAB, 2024).

Na região amazônica, onde o volume pluviométrico supera os 2.000 mm ao ano, a irrigação ainda se mostra relevante devido à distribuição irregular das chuvas e à alta demanda evapotranspiratória. No Acre, por exemplo, o déficit hídrico é mais crítico de junho a setembro, quando as chuvas mensais ficam abaixo de 50 mm (AGRITEMPO, 2021), coincidindo com o período de florescimento da cultura seguido pela formação dos frutos. Essa breve, porém, intensa estação seca pode levar ao abortamento das emissões florais e à queda de frutos novos, quando o suprimento hídrico após a retomada das chuvas não é suficiente (MARCOLAN *et al.*, 2009).

De acordo com Cararo e Dias (2015), a demanda hídrica do cafeeiro é influenciada por uma combinação de fatores climatológicos, pedológicos, fisiológicos e práticas agrícolas. Em Rondônia, a vazão média para projetos de irrigação localizada em cafeeiros, com base na evapotranspiração potencial de agosto, é de aproximadamente $25,18 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1} \text{ ha}^{-1}$.

Através do manejo adequado da irrigação, especialmente durante o curto período seco, é possível sincronizar a florada da lavoura por meio da indução floral. O cafeeiro deve passar por um período breve de seca, onde as gemas atinjam um potencial hídrico de pelo menos $-1,2 \text{ MPa}$ (MAGALHÃES e ANGELOCCI, 1976). Com a retomada da umidade, ocorre a quebra da dormência das gemas, resultando na abertura das flores. Para garantir uma produção eficiente, a distribuição hídrica ao longo do ano deve ser regular, com médias acumuladas variando de 1.000 a 1.500 mm (SILVA e REIS, 2017).

A utilização da irrigação no momento certo e na quantidade adequada oferece vantagens competitivas significativas para a cultura do café, refletindo-se em maior crescimento, produtividade e qualidade do produto (CARARO e DIAS, 2015). Em contraste, as plantas cultivadas em sequeiro são mais suscetíveis aos danos causados pela falta de água, que resultam de desequilíbrios metabólicos relacionados aos processos fisiológicos e bioquímicos (SHAO *et al.*, 2008).

1.5 ALTERAÇÕES MORFOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS EM PLANTAS SOB ESTRESSE HÍDRICO

O déficit hídrico é um dos principais fatores que afetam o crescimento e produtividade das plantas, impondo restrições que alteram suas funções fisiológicas. A escassez de água no solo impacta as relações hídricas nas plantas, gerando adaptações metabólicas e desencadeando reações bioquímicas que podem causar danos significativos ao desenvolvimento vegetal (RONCHI e DaMATTA, 2017).

O primeiro sintoma mensurável de resposta ao déficit hídrico nas plantas é a redução do crescimento, caracterizando uma resposta morfofisiológica. A perda de turgor afeta de imediato o processo de expansão celular, mesmo antes que sinais visíveis de deficiência hídrica sejam observados. Quando o déficit hídrico se prolonga, os danos tornam-se mais evidentes, manifestando-se em uma área foliar reduzida, tanto em termos de tamanho das folhas individuais quanto no número total de folhas (SOUROUR *et al.*, 2017).

Sob a perspectiva fisiológica, a deficiência de água inicialmente reduz o potencial hídrico foliar (Ψ_w) (SHAO *et al.*, 2008). Esse decréscimo no turgor e/ou potencial hídrico foliar induz um fechamento rápido dos estômatos, um processo regulado pelo aumento na produção de ácido abscísico (ABA), para minimizar a perda de água pela transpiração (E). No entanto, essa resposta também limita a absorção de CO₂ pelas folhas, resultando em menores taxas de fotossíntese (DEUNER *et al.*, 2011; SOUROUR *et al.*, 2017).

O principal impacto fisiológico da estiagem é, portanto, a limitação da fotossíntese (SOUROUR *et al.*, 2017). Em condições de estresse hídrico moderado, os processos fotoquímicos não sofrem grandes alterações, mas a bioquímica de fixação de CO₂ é comprometida. Com o fechamento estomático e a redução na condutância do mesófilo, a difusão de CO₂ da atmosfera para o local de carboxilação diminui, levando a uma menor concentração interna de CO₂ (BERTOLLI *et al.*, 2012).

A redução do suprimento de CO₂ não é o único fator responsável pela diminuição da fotossíntese sob condições de seca severa. Em tais situações, há também uma queda na eficiência de carboxilação e na quantidade e atividade das enzimas essenciais ao metabolismo fotossintético, como a Rubisco e outras enzimas envolvidas no ciclo de Calvin-Benson, como a regeneração de ribulose-1,5-bifosfato (SOUROUR *et al.*, 2017; CHEKOL *et al.*, 2024). Esse funcionamento reduzido do ciclo de Calvin-Benson provoca um desequilíbrio entre as fases fotoquímica e de redução de carbono, resultando em um aumento na proporção NADPH/NADP⁺ no estroma (SANTOS *et al.*, 2014).

O estresse hídrico altera a proporção de clorofilas 'a' e 'b' e carotenoides (DaMATTA e RAMALHO, 2006; SHAO *et al.*, 2008; SOUROUR *et al.*, 2017). Para evitar sobrecarga energética nos cloroplastos, as plantas podem reduzir o conteúdo de clorofila, diminuindo, assim, a captação de luz. Segundo Santos *et al.* (2014), quando as plantas são expostas a condições de seca, outros componentes do processo fotossintético são também afetados. O estresse hídrico moderado a severo inibe a biossíntese de clorofila, prejudicando a eficiência de absorção da luz, uma condição que pode ser observada por meio da fluorescência da clorofila, que reflete a intensidade da fotoinibição. Com o aumento do estresse hídrico, observam-se reduções na extinção fotoquímica (qP), na taxa relativa de transporte de elétrons (ETR), no rendimento quântico variável do fotossistema II (Φ_{PSII}) e no rendimento quântico máximo (Fv/Fm) (TOUNEKTI *et al.*, 2018).

O desequilíbrio no aparato fotossintético, causado pela seca, pode resultar em produção e acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs). Essa é uma característica típica do estresse hídrico nas plantas (MELO *et al.*, 2020; SCHNEIDER *et al.*, 2019). As EROs, como o radical superóxido (O₂⁻),

o radical hidroxila ($\cdot\text{OH}$), o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e o oxigênio singlete ($^1\text{O}_2$), são produzidos por reações redox (oxidação-redução) ou são o derivado ativo do O_2 (SINGH *et al.*, 2017). Estas moléculas são geradas em processos metabólicos como a fotossíntese e respiração nos cloroplastos, mitocôndrias, peroxissomos, citosol e apoplasto. O principal local de produção de O_2^- , por exemplo, é o acceptor primário de elétrons de PSI ligado à membrana do tilacóide (GILL e TUTEJA, 2010). Em situação de estresse há um desbalanço entre a produção e eliminação dessas EROs que, em altas concentrações, tornam-se altamente reativas e tóxicas, causando danos principalmente em lipídeos, proteínas e ácidos nucleicos (GILL e TUTEJA, 2010; SOUROUR *et al.*, 2017; SCHNEIDER *et al.*, 2019). Em condições de alta luminosidade, este problema é exacerbado devido ao excesso de elétrons nos sistemas de transporte do tilacóide, causando superexcitação dos centros de reação e aumentando a produção de EROs (SANTOS *et al.*, 2014).

Em níveis basais, as EROs são essenciais para a vida nas plantas desempenhando funções celulares como a sinalização e respostas de defesa. Podem atuar como moléculas sinalizadoras que regulam diversos processos associados ao estresse, como no próprio movimento estomático (SINGH *et al.*, 2017). Tem papel importante em outros mecanismos de proteção, como produção e acúmulo de osmólitos, transporte de elétrons e melhoria da atividade de enzimas antioxidantes (MELO *et al.*, 2020). Entretanto, sob condições de estresse, como de restrição hídrica, ocorre mudanças nos componentes de produção das EROs, induzindo seu acúmulo e, consequentemente a atividade tóxica dessas moléculas (GILL e TUTEJA, 2010; SCHNEIDER *et al.*, 2019).

Segundo Gill e Tuteja (2010), a peroxidação de lipídios é considerada o processo conhecido mais prejudicial que ocorre nos organismos vivos a partir do acúmulo das EROs. As plantas, entretanto, possuem estratégias específicas para evitar ou diminuir os danos causados pelo estresse oxidativo em resposta ao déficit hídrico. Esses envolvem mudanças na bioquímica celular pelo rápido acúmulo e atividade de enzimas específicas (SHAO *et al.*, 2008).

1.6 MECANISMOS DE TOLERÂNCIA AO ESTRESSE HÍDRICO

Em resposta as condições adversas causadas pelo estresse hídrico, as plantas desenvolveram uma série de mecanismos de tolerância que permitem a sobrevivência e a manutenção da produtividade em ambientes com baixa disponibilidade de água. Esses mecanismos podem ser classificados em fisiológicos, morfológicos e bioquímicos (OZTURK *et al.*, 2020).

Os mecanismos fisiológicos são as respostas imediatas das plantas ao estresse hídrico. Um dos principais é o fechamento estomático, que reduz a transpiração e, consequentemente, a perda de água. Essa resposta é mediada pelo hormônio ácido abscísico (ABA), que é sintetizado em resposta à seca e induz o fechamento dos estômatos (FERNANDES *et al.*, 2021).

O aumento na atividade de enzimas antioxidantes é uma resposta importante, uma vez que o estresse hídrico pode causar estresse oxidativo, levando à formação de espécies reativas de oxigênio que

danificam as células (RAMALHO *et al.*, 2018). O acúmulo de EROs pode ser neutralizado por sistemas antioxidantes enzimáticos que são encontrados em quase todos os compartimentos celulares. Esses incluem uma variedade de enzimas, como superóxido dismutase (SOD), ascorbato peroxidase (APX), glutathiona peroxidase (GPX), glutathiona-S-transferase (GST) e catalase (CAT) e metabólitos como carotenoides e flavonoides, os quais têm sido propostos como importantes na tolerância ao estresse da planta (GILL e TUTEJA, 2010; SANTOS *et al.*, 2014). A SOD é a primeira linha de defesa contra os efeitos tóxicos de EROs de níveis elevados. Removem o O_2^- reduzindo um O_2 a H_2O_2 e outro oxidado a O_2 . Sua atividade pode ser detectada por coloração negativa e identificada com base em sua sensibilidade a KCN e H_2O_2 . As CATs têm o potencial de dismutar diretamente H_2O_2 em H_2O e O_2 , tendo uma das maiores taxas de renovação entre todas as enzimas. A APX está envolvida na eliminação de H_2O_2 em ciclos água-água e ASH-GSH (ascorbato-glutationa). Nesse processo, o ácido ascórbico é usado como cofator para reduzir o H_2O_2 a H_2O e O_2 , utilizando NADPH para restaurar o ácido ascórbico, permitindo que o ciclo continue (GILL e TUTEJA, 2010; SCHNEIDER *et al.*, 2019).

Outro mecanismo de proteção é a manutenção do teor de água na célula e a proteção de biomoléculas durante o estresse a partir do rápido acúmulo de solutos compatíveis. Para evitar a perda de água durante a seca, as plantas aumentam da síntese de osmólitos, induzidas pelo estresse a nível celular (OZTURK *et al.*, 2020). O acúmulo de açúcares simples, como a frutose e a glicose, ou de aminoácidos, como a prolina, restabelece o equilíbrio osmótico, mantendo a homeostase celular. O acúmulo de prolina nos tecidos da planta é considerado como indicador de tolerância ao estresse por seca (SOUROUR *et al.*, 2017; MELO *et al.*, 2020). O ajuste osmótico depende da fotossíntese para fornecer solutos compatíveis. À medida que a desidratação se intensifica, a fotossíntese é inibida, o que reduz o fornecimento desses solutos. Com a contínua limitação de água, o ajuste osmótico é mantido, mas não consegue evitar completamente a desidratação (SOUROUR *et al.*, 2017). O acúmulo desses compostos também opera como estabilizante do sistema antioxidante, conduzindo à redução do efeito de EROs e integridade do sistema de membranas (osmoprotetores) (SCHNEIDER *et al.*, 2019).

A privação de água induz o acúmulo de ácido abscísico (ABA), o qual regula a expressão de muitos genes sob condições de estresse osmótico. Esses são importantes na tolerância ao estresse em plantas, coordenando uma série de sinais envolvidas na otimização do uso da água, como um exemplo típico, o fechamento estomático. O ABA é produzido na raiz, que é o tecido que primeiro identifica a redução da disponibilidade de água. Depois o ABA é transportado pelo xilema até as folhas para induzir o fechamento estomático. A quantidade de ABA no xilema aumenta substancialmente à medida que diminui a disponibilidade de água no solo (NAKASHIMA *et al.*, 2014; SOUROUR *et al.*, 2017; MELO *et al.*, 2020).

Os mecanismos morfológicos incluem adaptações estruturais que ajudam as plantas a lidarem com a escassez de água. Um dos mais relevantes é o desenvolvimento de raízes mais profundas e extensas, que permitem a captura de água em camadas mais profundas do solo. Essa adaptação é crítica em regiões com solos rasos ou períodos prolongados de seca (AMAN *et al.*, 2024). A arquitetura da

planta também pode ser alterada para minimizar a perda de água. Folhas menores, mais espessas e com menor área superficial são características que ajudam a reduzir a transpiração. Além disso, a disposição das folhas pode ser ajustada para maximizar a eficiência na captura de luz solar enquanto minimiza a perda de água (SANTOS *et al.*, 2022).

1.7 ESTRESSE HÍDRICO EM CAFEEIROS

Em todos os países produtores de café, o déficit hídrico é considerado o maior fator limitante para a produção da cultura (TOUNEKTI *et al.*, 2018). Embora o cafeeiro seja uma espécie caracterizada por ser sensível à seca, grandes parques produtivos estão situados em regiões onde as plantas encontram-se propensas a períodos intensos de seca. Os efeitos do déficit hídrico no cafeeiro podem ser maximizados quando associadas a altas temperaturas, irradiância e DPV, o que comumente acontece nessas regiões (SILVA *et al.*, 2015).

As plantas de café são afetadas pela restrição hídrica desde as fases florada e frutificação até, aproximadamente, 18 semanas após emissão das flores (período crítico de deficiência hídrica no cafeeiro) e a magnitude desse processo vai depender da intensidade e duração em que o déficit é imposto e da diversidade genotípica entre suas cultivares quanto à tolerância à seca (SHAO *et al.*, 2008; BONOMO *et al.*, 2016). O potencial hídrico (Ψ_w) limite que as plantas de café conseguem tolerar é de de -2,0 a -2,5 MPa; valores inferiores são considerados críticos (DEUNER *et al.*, 2011).

O cafeeiro possui baixa condutividade hidráulica, o que resulta num apreciável fechamento estomático (g_s). Se a disponibilidade hídrica no solo diminui, também o seu potencial hídrico será reduzido. Tal condição resultará em um rápido fechamento estomático, reduzindo significativamente as taxas fotossintéticas (A), o crescimento e a produtividade do cafeeiro (DEUNER *et al.*, 2011; CHESEREK e GICHIMU, 2012; BONOMO *et al.*, 2016; TOUNEKTI *et al.*, 2018). Entretanto, os efeitos da seca sobre a g_s são mais fortes que na A , sugerindo que a g_s seja o fator chave que limita o rendimento do cafeeiro sob condição de seca (DaMATTA e RAMALHO, 2006). O aumento da g_s , quando as folhas estão ainda túrgidas, mostra que os estômatos do café participam ativamente do processo de redução das perdas hídricas, iniciando seu fechamento aos primeiros sinais de restrição hídrica, o que parece ser uma das primeiras estratégias para minimizar as perdas de água pela transpiração (DEUNER *et al.*, 2011; CHEKOL *et al.*, 2024).

A capacidade do cafeeiro de re-saturar seus tecidos foliares durante a noite (capacidade de ressaturação diária) auxilia na capacidade de evitar a desidratação do tecido sob condições de estresse baixo a moderado (TOUNEKTI *et al.*, 2018). Segundo Thioune *et al.* (2017), os estômatos das folhas superiores de cafeeiros canéfora fecharam mais rápido do que aqueles das folhas inferiores, tendo em vista as maiores temperaturas obtidas nessas primeiras. No entanto, a taxa de g_s para as folhas inferiores é suficiente para evitar danos no fotossistema II (PSII) relacionados ao déficit de água. Os autores observaram alteração na fotoquímica do PSII com a perda de água nas folhas do cafeeiro.

O cafeeiro suporta longos períodos de seca ajustando mecanismos que levam à economia de água, proporcionalmente à intensidade do déficit hídrico (DEUNER *et al.*, 2011). Além do eficiente controle estomático, segundo Damatta e Ramalho (2006) os cafeeiros apresentam baixa elasticidade da parede celular. Isso permite que o turgor celular diminua mais lentamente à medida que a desidratação progride, reduzindo a flutuação de turgor e Ψ_w e protegendo as plantas contra estresse em mudanças de curto prazo no conteúdo de água.

A redução da produtividade sob condições de déficit hídrico pode ocorrer na magnitude de 10% em genótipos tolerantes e em até 90% em genótipos sensíveis. Todavia, considera-se que o cafeeiro consegue manter uma produção relativamente elevada sob condição de seca, isto via manutenção de status hídrico adequado (combinação de sistemas radiculares profundos e controle satisfatório da transpiração) (CHESEREK e GICHIMU, 2012).

Além disso, características bioquímicas seriam também importantes, como a existência de sistema antioxidativo mais robusto e manutenção da capacidade de exportação. Tais características parecem não assumir o mesmo papel de destaque nos clones que favorecem a sobrevivência em detrimento da produção (DaMATTA e RAMALHO, 2006). Quando submetidas à restrição de água no solo, plantas de café desencadeiam mecanismos relacionados à desintoxicação de radicais pela produção de compostos, como aminoácidos (TOUNEKTI *et al.*, 2018; CHEKOL *et al.*, 2024) e ação sincronizada de enzimas antioxidantes como CAT, APX, SOD e a glutathione redutase (GR) (DEUNER *et al.*, 2011). Tounekti *et al.* (2018) constataram o acúmulo de altos níveis de prolina em folhas de cafeeiros submetidos ao déficit hídrico.

Por meio da análise do comportamento da produção de H_2O_2 em cafeeiros sob restrição de água, Deuner *et al.* (2011) observaram que a concentração de H_2O_2 em plantas sob estresse hídrico (Ψ_w -2,5 MPa) foi 100% maior que a encontrada nas plantas controle (Ψ_w -0,2 Mpa). Sob seca severa (Ψ_w -4,0 MPa) os cafeeiros apresentam murcha irreversível e queda de folhas, reduzindo a área fotossinteticamente ativa (TOUNEKTI *et al.*, 2018). Nessas condições, a inibição da fotossíntese certamente se torna importante. A senescência foliar também é acelerada, particularmente em folhas fisiologicamente mais velhas (DaMATTA e RAMALHO, 2006; THIOUNE *et al.*, 2017).

A expressão ao qual o déficit hídrico ocasiona no cafeeiro são dependentes da intensidade, duração e da capacidade que a planta apresenta em tolerar as mudanças ambientais. Assim, pode-se minimizar o efeito de veranicos intensos sobre as plantas em duas perspectivas: a primeira ocorre quando se evita a seca, fornecendo a planta condições de se desenvolver através da manutenção da água do solo ou do fornecimento de irrigação, enquanto o segundo está relacionado a tolerância a seca, onde as plantas mantem sua atividade fisiológica mesmo quando submetidas a baixas disponibilidades hídricas (BONOMO *et al.*, 2016).

As alterações morfológicas e bioquímicas observadas em *Coffea canephora* sob condições de déficit hídrico representam estratégias adaptativas que conferem maior resistência a ambientes com baixa disponibilidade hídrica. No entanto, o impacto do estresse hídrico sobre a produtividade e a

qualidade dos grãos destaca a importância do manejo adequado da irrigação e de práticas agronômicas que minimizem os efeitos desse estresse. A compreensão detalhada desses mecanismos pode contribuir para o desenvolvimento de cultivares ainda mais tolerantes à seca, garantindo a sustentabilidade da produção de café em cenários de mudanças climáticas (SANTOS *et al.*, 2021).

A identificação de variedades de café com resistência ao estresse hídrico é um foco importante do melhoramento genético. A análise de características fenotípicas e genotípicas pode ajudar a identificar cultivares que apresentam melhor desempenho sob condições de estresse. Estudos de mapeamento de QTLs (Quantitative Trait Loci, ou Locais de Características Quantitativas) têm sido realizados para identificar genes relacionados à tolerância ao estresse hídrico (ANDLEEB *et al.*, 2020).

Alguns programas de melhoramento têm se concentrado em cruzamentos entre espécies de *Coffea canephora* e *Coffea arabica*, para combinar características de resistência. Variedades que demonstram maior eficiência no uso da água e melhor capacidade de resposta ao estresse hídrico são prioritárias (SANTOS *et al.*, 2021; CHEKOL *et al.*, 2024). Além do melhoramento genético, práticas de manejo agrônomo podem aumentar a resiliência das plantações de café ao estresse hídrico. O uso de técnicas de irrigação eficientes, como a irrigação por gotejamento, permite uma aplicação mais precisa da água, minimizando o desperdício e maximizando a eficiência no uso hídrico (HO *et al.*, 2022).

REFERÊNCIAS

- AMAN, M.; WORKU, M.; SHIMBIR, T.; ASTATKIE, T. Root traits and biomass production of drought-resistant and drought-sensitive arabica coffee varieties growing under contrasting watering regimes. **Agrosyst. Geosci. Environ.**, v. 7, e20488, 2024.
- ANDLEEB, T.; SHAH, T.; NAWAZ, R.; MUNIR, I.; MUNSIF, F.; JALAL, A. QTL Mapping for Drought Stress Tolerance in Plants. In: HASANUZZAMAN, M.; TANVEER, M. Salt and Drought Stress Tolerance in Plants. **Signaling and Communication in Plants**. Springer, p. 383-403, 2020.
- ARAÚJO, E. A.; BARDALES, N. G.; AMARAL, E. F.; LANI, J. L.; AMARAL, E. F. In: BERGO, C. L.; BARDALES, N. G. **Zoneamento Edafoclimático para o Cultivo do Café Canéfora (*Coffea canephora*) no Acre**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Cap. 2, p. 22-46.
- BERTOLLI, S. C.; RAPCHAN, G. L.; SOUZA, G. M. Photosynthetic limitations caused by different rates of water-deficit induction in *Glycine max* and *Vigna unguiculata*. **Photosynthetica**, v. 50, n. 3, p. 329–336, 2012.
- BONOMO, R.; SOUZA, J. M. Uso eficiente da água na irrigação do cafeeiro Conilon. In: PARTELLI, F. L.; BONOMO, R. **Café conilon: o clima e o manejo da planta**. Alegre, ES: CAUFES, 2016. Cap. 6, p. 93-110.
- CARARO, D. C.; DIAS, A. F. S. Irrigação em cafeeiros. In: MARCOLAN, A. L.; ESPINDULA, M. C. **Café na Amazônia**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Cap. 14, p. 311-342.

- CHEKOL, H.; WARKINEH, B.; SHIMBER, T.; MIEREK-ADAMSKA, A.; DABROWSKA, G. B.; DEGU, A. Drought Stress Responses in Arabica Coffee Genotypes: Physiological and Metabolic Insights. **Plants**, v. 13, n. 6, 828, 2024.
- CHESEREK, J. J.; GICHIMU, B. M. Drought and heat tolerance in coffee: a review. **International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science**, v. 2, n. 12, p. 498-501, 2012.
- Companhia Nacional de Abastecimento**. Acompanhamento da safra brasileira de café. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, v. 11, n. 3, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>. Acesso em: 02 de abril de 2025.
- Companhia Nacional de Abastecimento**. Acompanhamento da safra brasileira de café. Brasília, DF: Companhia Nacional de Abastecimento, v. 12, n. 1, 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>. Acesso em: 25 de nov de 2024.
- COSTE, R. *Coffea*: the plant and the product. London: Macmillan, 1992. 328 p.
- CUSTÓDIO, A. M. **Physiological and productivity attributes of amazonian robustas (*Coffea canephora*) cultivated in Rondônia, Brazil**. 2022. Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2022.
- DaMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian journal of plant physiology**, v. 18, n. 1, p. 55-81, 2006.
- DAVIS, A. P.; TOSH, J.; RUCH, N.; FAY, M. F. Growing coffee: *Psilanthus* (Rubiaceae) subsumed on the basis of molecular and morphological data: implications for the size, morphology, distribution and evolutionary history of *Coffea*. **Botanical Journal of the Linnean Society**, London, v. 167, n. 1, p. 357-377, 2011.
- DEUNER, S.; ALVES, J. D.; ZANANDREA, I.; GOULART, P. D. F. P.; SILVEIRA, N. M.; HENRIQUE, P. D. C.; MESQUITA, A. C. Stomatal behavior and components of the antioxidative system in coffee plants under water stress. **Scientia Agricola**, v. 68, p. 77-85, 2011.
- ESPINDULA, M. C. *et al.* Condução de cafeeiros *Coffea canephora*. In: MARCOLAN, A.; ESPINDULA, M. C. **Café na Amazônia**. Brasília: Embrapa, 2015. p. 219-236.
- FERNANDES, I.; MARQUES, I.; PAULO, O. S.; BATISTA, D.; PARTELLI, F. L.; LIDON, F. C.; DaMATTA, F. M.; RAMALHO, J. C.; RIBEIRO-BARROS, A. I. Understanding the Impact of Drought in *Coffea* Genotypes: Transcriptomic Analysis Supports a Common High Resilience to Moderate Water Deficit but a Genotype Dependent Sensitivity to Severe Water Deficit. **Agronomy**, v. 11, n. 11, 2255, 2021.
- FERRÃO, M. A. G.; FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A.; VERDIN FILHO, A. C. VOLPI, P. S. Origem, Dispersão Geográfica, Taxonomia e Diversidade Genética de *Coffea canephora*. In: FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A.; FERRÃO, M. A. G.; MUNER, L. H. **Café Conilon**. 2. ed. Vitória, ES: Ed. Incaper, 2017. Cap. 4, p. 81-101.

- FONSECA, A. F. A.; FERRÃO, M. A. G.; FERRÃO, R. G.; VERDIN FILHO, A. C. O café conilon. In: FONSECA, A. F. A.; SAKIAMA, N. S.; BORÉM, A. **Café conilon: do plantio à colheita**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2015.
- GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant physiology and biochemistry**, v. 48, n. 12, p. 909-930, 2010.
- GIURIATTO JUNIOR, J. J. T.; ESPINDULA, M. C.; ARAUJO, L. F. B. de; VASCONCELOS, J. M.; CAMPANHARO, M. Growth and physiological quality in clonal seedlings of Robusta coffee. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, n. 4, e20196920, 2020.
- HO, T. Q.; HOANG, V. N.; WILSON, C. Sustainability certification and water efficiency in coffee farming: The role of irrigation Technologies. **Resources, Conservation and Recycling**, v.180, 106175, 2022.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA: Produção agrícola municipal. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 22 out. 2024.
- LOPES JUNIOR, H.; ROCHA, R. B.; KOLLN, A. M.; ALVES, E. A.; TEIXEIRA, A. L. Robustas amazônicas: qualidade do café de Rondônia. **Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente**, v. 14, n. 2, p. 466-481, 2023.
- LOURENÇO, J. L. R.; ROCHA, R. B.; ESPINDULA, M. C.; ALVES, E. A.; TEIXEIRA, A. L.; FERREIRA, F. M. Genotype × Environment Interaction in the Coffee Outturn Index of Amazonian Robusta Cultivars. **Agronomy**, v. 12, 2874, 2022.
- MAGALHÃES, A.C.; ANGELOCCI, L.R. Sudden alterations in water balance associated with flower bud opening in coffee plants. **Journal of Horticultural Science**, 51: 419-423, 1976.
- MARCOLAN, A. L. *et al.* **Cultivo dos cafeeiros conilon e robusta para Rondônia**. Porto Velho, RO: Embrapa Rondônia/Emater - RO, 2009. 67 p.
- MARCOLAN, A. L.; RAMALHO, A. R.; MENDES, A. M.; TEIXEIRA, C. A. D.; FERNANDES, C. F.; COSTA, J. N. M.; VIEIRA JÚNIOR, J. R.; OLIVEIRA, S. J. M.; FERNANDES, S. R.; VENEZIANOET, W. **Cultivo dos Cafeeiros Conilon e Robusta para Rondônia**. 3 ed. Porto Velho: EMBRAPA/EMATER (Sistema de Produção), 2009. 61 p.
- MELO, B. P.; LOURENÇO-TESSUTTI, I. T.; PAIXÃO, J. F. R.; NORIEGA, D. D.; SILVA, M. C. M.; DE ALMEIDA-ENGLER, J.; ... GROSSI-DE-SA, M. F. Transcriptional modulation of AREB-1 by CRISPRa improves plant physiological performance under severe water deficit. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 1-10, 2020.
- MUSOLI, C. P.; CUBRY, P.; ALUKA, P.; BILLOT. C.; DUFOUR, M.; DE BELLIS, F.; POT D.; BIEYSSE, D.; CHARRIER, A.; LEROY, T. Genetic differentiation of wild and cultivated populations: Diversity of *Coffea canephora* Pierre in Uganda. **Genome**, Ottawa, v. 52, n.7, p.634-646, 2009.

- NAKASHIMA, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; SHINOZAKI, K. The transcriptional regulatory network in the drought response and its crosstalk in abiotic stress responses including drought, cold, and heat. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, p. 170, 2014.
- OLIVEIRA, L. N. L.; ROCHA, R. B.; FERREIRA, F. M.; SPINELLI, V. M.; RAMALHO, A. R.; TEIXEIRA, A. L. Selection of *Coffea canephora* parents from the botanical varieties Conilon and Robusta for the production of intervarietal hybrids. **Ciência Rural**, v. 48, p. 1-7, 2018.
- OLIVEIRA, S. J. M.; ARAUJO, L. V. Aspectos econômicos da cafeicultura. In: MARCOLAN, A. L.; ESPINDULA, M. C. **Café na Amazônia**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Cap. 1, p. 27-37.
- OZTURK, M.; UNAL, B. T.; GARCÍA-CAPARRÓS, P.; KHURSHEED, A.; GUL, A.; HASANUZZAMAN, M. Osmoregulation and its actions during the drought stress in plants. **Physiologia Plantarum**, v. 172, n. 2, p. 1321-1335, 2020.
- RAMALHO, J. C.; RODRIGUES, A. P.; LIDON, F. C.; MARQUES, L. M. C.; LEITÃO, A. E.; FORTUNATO, A. S.; PAIS, I. P.; SILVA, M. J.; SCOTTI-CAMPOS, P.; LOPES, A.; REBOREDO, F. H.; RIBEIRO-BARROS, A. I. Stress cross-response of the antioxidative system promoted by superimposed drought and cold conditions in *Coffea* spp. **Plos One**, v. 13, n. 6, e0198694, 2018.
- RESENDE, M. D. V.; BARBOSA, M. H. P. **Melhoramento genético de plantas de propagação assexuada**. Colombo: Embrapa Florestas, 2005. 130p.
- ROCHA, R. B.; TEIXEIRA, A. L.; RAMALHO, A. R.; SOUZA, F. F. Melhoramento de *Coffea canephora*: considerações e metodologias. Em: MARCOLAN, A. L.; ESPINDULA, M. C. **Café na Amazônia**. Embrapa, Porto Velho, 2015. p. 101-126.
- RONCHI, C. P.; DaMATTA, F. M. Aspectos Fisiológicos do Café Conilon. In: FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A.; FERÃO, M. A. G.; MUNER, L. H. (Ed.). **Café conilon**. 2ª ed, atual. e ampl. Vitória, ES: Incaper, 2017. 784 p. Cap. 5, p. 103-129.
- SÁ, C. P.; BERGO, C. L.; LIMA, M. N.; FERREIRA, O. Características Gerais da Cafeicultura no Estado do Acre. In: BERGO, C. L.; BARDALES, N. G. **Zoneamento Edafoclimático para o Cultivo do Café Canéfora (*Coffea canephora*) no Acre**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Cap. 1, p. 15-21.
- SANTOS, C. M.; SILVA, M. A.; LIMA, G. P. P.; BORTOLHEIRO, F. P. D. A. P.; BRUNELLI, M. C.; HOLANDA, L. A.; OLIVER, R. Physiological changes associated with antioxidant enzymes in response to sugarcane tolerance to water deficit and rehydration. **Sugar Tech**, v. 17, n. 3, p. 291-304, 2014.
- SANTOS, C. S. dos; MATOS, N. M. S. de; REZENDE, T. T.; MAURI, J.; RODRIGUES, G. C.; VEIGA, A. D.; BARTHOLO, G. F.; CARVALHO, M. A. de F. Agronomic, anatomic and physiological characterization of *Coffea arabica* L. genotypes on irrigated system in the Central Cerrado. **Coffee Science**, e172021, 2022.

- SANTOS, M. de O.; COELHO, L. S.; CARVALHO, G. R.; BOTELHO, C. E.; TORRES, L. F.; VILELA, D. J. M.; ANDRADE, A. C.; SILVA, V. A. Photochemical efficiency correlated with candidate gene expression promote coffee drought tolerance. **Scientific Reports**, v. 11, n. 7436, 2021.
- SCHMIDT, R.; SILVA, C. A. da; SILVA, L. O. E.; ESPINDULA, M. C.; RODRIGUES, W. P.; VIEIRA, H. D.; TOMAZ, M. A.; PARTELLI, F. L. Accumulation of nutrients and the relation between fruit, grain, and husk of coffee Robusta cultivated in Brazilian Amazon. **Plants**, v. 12, 3476, 2023.
- SCHNEIDER, J. R.; CAVERZAN, A.; CHAVARRIA, G. Water deficit stress, ROS involvement, and plant performance. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 65, n. 8, p. 1160-1181, 2019.
- SHAO, H. B.; CHU, L. Y.; JALEEL, C. A.; ZHAO, C. X. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. **Comptes rendus biologiques**, v. 331, n. 3, p. 215-225, 2008.
- SILVA, J. G. F.; REIS, E. F. Irrigação e Manejo da Água no Café Conilon. In: FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A.; FERRÃO, M. A. G.; MUNER, L. H. **Café Conilon**. Vitória, ES: Incaper, 2017. 2. ed. Cap. 15, p. 359-380.
- SILVA, M. J. G.; SARAIVA, F. A. M.; SILVA, A. A. G.; SANTOS NETO, L. A.; QUERINO, C. A. S. Clima. In: MARCOLAN, A. L.; ESPINDULA, M. C. **Café na Amazônia**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Cap. 2, p. 41-56.
- SINGH, R.; PARIHAR, P.; SINGH, S.; MISHRA, R. K.; SINGH, V. P.; PRASAD, S. M. Reactive oxygen species signaling and stomatal movement: current updates and future perspectives. **Redox Biology**, v. 11, p. 213-218, 2017.
- Sistema de monitoramento agrometeorológico - AGRITEMPO. Dados meteorológicos:** Acre. Disponível em: < <https://www.agritempo.gov.br/agritempo/index.jsp>>. Acesso em: 8 jul. 2021.
- SOUROUR, A.; AFEF, O.; MOUNIR, R.; MONGI, B. Y. A review: morphological, physiological, biochemical and molecular plant responses to water deficit stress. **The International Journal Of Engineering And Science**, v. 6, n. 1, p. 1-4, 2017.
- SOUZA, F. F.; FERRÃO, L. F. V.; CAIXETA, E. T.; SAKIAMA, N. S.; PEREIRA, A. A.; OLIVEIRA, A. C. B. C. Aspectos gerais da biologia e da diversidade genética de *Coffea canephora*. In: MARCOLAN, A. L.; ESPINDULA, M. C. **Café na Amazônia**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Cap. 4, p. 83-98.
- TADEU, H. C.; XIMENES, V. F.; LOPES, M. T. G.; ESPINDULA, M. C.; ALVES, A. P. de C.; BORÉM, F. M. Analysis of bioactive compounds, organic acids, and genetic parameters of ten amazonian robusta cultivars. **Revista Caatinga**, v. 37, e12017, 2024.
- TEIXEIRA, A. L.; ROCHA, R. B.; ESPINDULA, M. C.; RAMALHO, A. R.; VIEIRA JUNIOR, J. R.; ALVES, E. A.; LUNZ, A. M. P.; SOUZA, F. de F.; COSTA, J. N. M.; FERNANDES, C. de F. Amazonian Robustas - new *Coffea canephora* coffee cultivars for the Western Brazilian Amazon. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 20, n. 3, e323420318, 2020.

- THIOUNE, E.; MCCARTHY, J.; GALLAGHER, T.; OSBORNE, B. A humidity shock leads to rapid, temperature dependent changes in coffee leaf physiology and gene expression. **Tree Physiology**, v. 37, 2017.
- TOUNEKTI, T.; MAHDHI, M.; AL-TURKI, T. A.; KHEMIRA, H. Water relations and photo-protection mechanisms during drought stress in four coffee (*Coffea arabica*) cultivars from southwestern Saudi Arabia. **South African journal of botany**, v. 117, p. 17-25, 2018.

CAPÍTULO II

FISIOLOGIA E BIOQUÍMICA DE CAFEEIROS CANÉFORA EM FUNÇÃO DE DIFERENTES TENSÕES DE ÁGUA NO SOLO EM CONDIÇÕES DE CAMPO

FISIOLOGIA E BIOQUÍMICA DE CAFEEIROS CANÉFORA EM FUNÇÃO DE DIFERENTES TENSÕES DE ÁGUA NO SOLO EM CONDIÇÕES DE CAMPO

Núbia Pinto Bravin, Marcio de Oliveira Martins

Resumo

A sustentabilidade do cultivo de *Coffea canephora* em regiões sujeitas a estresses hídricos depende da seleção de cultivares adaptadas às condições de manejo hídrico e variabilidade ambiental. Neste estudo objetivou-se avaliar os parâmetros fisiológicos e bioquímicos de cultivares de cafeeiros canéfora sob diferentes tensões de água no solo. O experimento foi conduzido em esquema de parcela subdividida, composto pela combinação de cinco tensões de água no solo (20 kPa, 40 kPa, 60 kPa, 100 kPa e sem irrigação) e seis cultivares de café canéfora (BRS 1216, BRS 2299, BRS 2314, BRS 3210, BRS 3213 e BRS 3220), alocadas como parcelas principais e subparcelas, respectivamente. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com três repetições. Durante dois anos, as plantas em fase de crescimento (2021) e de produção (2022) foram avaliadas quanto às trocas gasosas, a fluorescência da clorofila-a, dano de membranas, conteúdo relativo de água e teores de pigmentos fotossintéticos e metabólitos. Plantas jovens de canéfora não irrigadas apresentaram menor taxa fotossintética (A) e transpiração (E) aliada à menor condutância estomática (g_s). A eficiência fotoquímica do PSII e os mecanismos de dissipação de energia, com exceção do NPQ, também foi menor na ausência da irrigação. Os teores de carboidratos solúveis se relacionaram negativamente com a fotossíntese. Durante a fase de crescimento, as cultivares BRS 1216 e BRS 3210 apresentaram maior produtividade fotossintética e BRS 2314 a menor. Concluiu-se que o ajuste dos estômatos e da absorção de luz no PSII pela redução da F_v/F_m e dos teores de pigmentos fotossintéticos mostraram ser importantes mecanismos dos cafeeiros canéforas para redução dos danos causados pelo estresse hídrico, e que as cultivares mantêm desempenho fotossintético sob alta tensão de água no solo, podendo ser cultivados em baixas lâminas de irrigação.

Palavras-chave: Café, Robustas Amazônicas, Estresse hídrico, Irrigação

1 INTRODUÇÃO

O café é uma das principais culturas agrícolas difundidas no mundo. Das 124 espécies classificadas no gênero *Coffea* L., *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* Pierre ex Froenher são as mais importantes comercialmente (DAVIS *et al.*, 2011). No Brasil, maior produtor e exportador mundial de café (ICO, 2025), 30% da produção corresponde à espécie *C. canephora* (CONAB, 2025).

O café canéfora é cultivado em regiões de menor altitude, abaixo de 800 m, e temperatura mais elevada, com média anual entre 22° e 26°C. Apresenta maior tolerância a curtos períodos de seca, com aptidão hídrica para regiões com déficit anual entre 150 mm e 200 mm (RONCHI e DaMATTA, 2017;

SILVA *et al.*, 2015). Na região Amazônica, segunda maior produtora de canéfora do país, grande parte das lavouras são constituídas por plantas híbridas, popularmente denominadas de Robustas Amazônicas. Esses híbridos são resultantes de cruzamentos naturais ou induzidos entre as plantas das variedades Conilon e Robusta (*C. canephora*), com predominância desta última (TEIXEIRA *et al.*, 2020). O cultivo da cultura na região, entretanto, é afetado pela distribuição irregular das chuvas ao longo do ano, tornando os cafeeiros suscetíveis a condições de estresse por déficit hídrico (SILVA *et al.*, 2015).

O déficit hídrico se destaca como um dos fatores de estresses ambientais que mais afeta o crescimento e produtividade das culturas (CHESEREK e GICHIMU, 2012). Alguns dos sintomas visíveis em plantas submetidas a limitação hídrica são murcha de folhas, redução no crescimento em altura, número e área de folhas e atraso na formação de botões e flores (SOUROUR *et al.*, 2017). No entanto, esses sintomas são resultantes de diversas alterações fisiológicas e metabólicas já ocorridas a nível celular (SOUROUR *et al.*, 2017; THIOUNE *et al.*, 2017). De forma geral, o déficit hídrico afeta a taxa fotossintética e taxa transpiratória dos cafeeiros. As alterações podem ser decorrentes da regulação da abertura e fechamento dos estômatos, absorção de CO₂ e a mobilização de fotoassimilados pela planta (DEUNER *et al.*, 2011; TOUNEKTİ *et al.*, 2018). O aumento da resistência à absorção de CO₂ é associado à diminuição do potencial de água na folha pela redução do conteúdo de água no solo, ou ainda, em resposta à elevada demanda atmosférica (DEUNER *et al.*, 2011). A permanência do estresse conduz a alterações ainda mais importantes no metabolismo da planta, relacionados com os processos fotoquímicos e bioquímicos (efeitos não estomáticos) (SCHNEIDER *et al.*, 2019).

As plantas possuem alternativas para eliminar ou diminuir os impactos do estresse hídrico. Os mecanismos de resistência ou tolerância envolvem mudanças na fisiologia, morfologia e na bioquímica celular. Estes incluem a manutenção do teor de água na célula a partir do acúmulo de solutos compatíveis (TOUNEKTİ *et al.*, 2018), aumento da atividade de enzimas antioxidantes (SCHNEIDER *et al.*, 2019), acúmulo de ABA (MELO, *et al.*, 2020) e mudanças na morfologia da planta (CHESEREK e GICHIMU, 2012; MACHADO FILHO *et al.*, 2021). Tais mecanismos regulam a eficiência do uso da água e, consequentemente, o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS), garantindo a sobrevivência das plantas (MELO, *et al.*, 2020). Em cafeeiros, o fechamento dos estômatos aos primeiros sinais de restrição hídrica é uma das primeiras estratégias para minimizar os danos por desidratação (DEUNER *et al.*, 2011). Essa expressiva redução estomática deve-se à sua baixa condutividade hidráulica que responde rapidamente à redução do potencial hídrico (Ψ_w) foliar (BONOMO *et al.*, 2016; CHESEREK e GICHIMU, 2012; TOUNEKTİ *et al.*, 2018). O Ψ_w foliar limite que as plantas de café podem tolerar é de -2,0 a -2,5 MPa. Valores de Ψ_w menores que esta faixa são considerados críticos para o cafeeiro (DEUNER *et al.*, 2011). A redução da produtividade sob condições de déficit hídrico pode ser de 10%, em genótipos tolerantes, e de até 90% em genótipos sensíveis e a magnitude desse processo vai depender da intensidade e duração em que o déficit é imposto (BONOMO *et al.*, 2016).

O cultivo irrigado tem sido uma importante estratégia para a minimização dos danos causados pelo estresse por seca e melhoria da produção agrícola. Segundo Silva *et al.* (2015), a distribuição anual

das chuvas e a ocorrência e severidade do déficit hídrico estão entre as variáveis climáticas que mais afetam as diferentes fases fenológicas da cafeicultura. Mesmo em regiões consideradas aptas ao cultivo do cafeeiro canéfora, o uso dessa técnica é justificável, visto que elimina os riscos decorrentes de secas ocasionais, além de garantir maior vigor vegetativo e produtividade (BONOMO *et al.*, 2014). Na Região Amazônica, onde o volume de precipitação supera os 2.000 mm anuais, o uso da irrigação para a condução dos genótipos cultivados ainda é necessário. Isso porque, durante os meses de junho a setembro ocorre na região o período de estiagem, caracterizado por intenso déficit hídrico, e as fases de floração e formação dos frutos novos dos cafeeiros canéfora coincidem com tal período. Além disso, altas temperaturas e um incremento significativo do DPV são observados, o que potencializa a ocorrência de estresses nas plantas (RONCHI e DaMATTA, 2017; SILVA *et al.*, 2015).

Notadamente, a suplementação hídrica é uma estratégia para a redução dos danos causados pelo déficit hídrico nos cafeeiros. Alguns estudos analisaram o efeito da irrigação no cultivo de canéforas na Amazônia (CUSTODIO *et al.*, 2022; DUBBERSTEIN *et al.*, 2017; MAX *et al.*, 2023; SOLIMÕES *et al.*, 2023). No entanto, o entendimento das implicações das variações de água no solo nos mecanismos fisiológicos dos Robustas Amazônicos ainda demanda conhecimento. O presente estudo foi realizado para avaliar os parâmetros fisiológicos e bioquímicos de cultivares de cafeeiros canéfora sob diferentes tensões de água no solo. Nós hipotetizamos que i. tensões de água no solo maiores que 60 kPa comprometem a taxa fotossintética (A) via redução na condutância estomática (g_s) e, consequentemente, na produção de carboidratos não estruturais (CST) em plantas de cafeeiro; ii. a produtividade fotossintética das plantas de cafeeiro (A) é compensada pela maior eficiência do uso da água (EUA) em condições de menor disponibilidade hídrica no solo, acoplada a uma menor sensibilidade ao déficit de pressão de vapor (DPV) e; iii. a maior retenção de água e solutos nos tecidos são capazes de minimizar danos celulares quando a disponibilidade de água no solo é menor que a demanda evapotranspiratória da cultura.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição do local e material vegetal

Um experimento de campo foi acompanhado durante o mês de setembro em dois anos consecutivos (2021 e 2022) na área experimental da Embrapa Acre, no município de Rio Branco, Acre (10°1'S, 67°42'W e 160 m). A classificação climática da região, segundo Köppen, é do tipo AM (tropical de monções), com precipitação média anual de 2.100 mm, temperatura máxima de 30,9° C e mínima de 20,8° C, e umidade relativa de 83% (ALVARES *et al.*, 2013). A região apresenta um período de estiagem bem definido, que ocorre entre os meses de junho a setembro. Entre os meses de outubro a maio compreende-se o período chuvoso, com maior acúmulo de chuvas no primeiro trimestre do ano (AGRITEMPO, 2024). O solo do local foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (SANTOS *et al.*, 2018).

O estudo foi realizado em uma lavoura de café canéfora (*Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner) com 29 meses de idade (implantada em março de 2019), composta por seis diferentes cultivares de Robustas Amazônicos (clones). Os genótipos foram oriundos de hibridação natural e controlada entre plantas matrizes das variedades conilon (GS1) e robusta (GS2) do Banco Ativo de Germoplasma da Embrapa Rondônia. Os materiais foram desenvolvidos pela Embrapa para cultivo na Amazônia Ocidental Brasileira, com seleção para as características agrônômicas como produtividade, resistência a estresses bióticos, compatibilidade entre cultivares e qualidade de bebida (TEIXEIRA *et al.*, 2020). A lavoura possuía uma densidade de 2.777,7 plantas ha⁻¹, com plantas espaçadas em 3 m x 1,2 m entre si.

Foi possível observar os cafeeiros em dois momentos distintos. No primeiro período de avaliação, as plantas, com 29 meses de idade, se encontravam ainda na fase juvenil, em transição para o início à fase reprodutiva (floração). No segundo período, após a primeira safra comercial e subsequente poda de produção, a fenologia das plantas já estava bem estabelecida para os ciclos produtivos.

2.2 Design Experimental

O experimento foi conduzido em esquema de parcela subdividida, composto pela combinação de cinco tensões de água no solo (20 kPa, 40 kPa, 60 kPa, 100 kPa e sem irrigação) e seis cultivares de café canéfora (BRS 1216, BRS 2299, BRS 2314, BRS 3210, BRS 3213 e BRS 3220), alocadas como parcelas principais e subparcelas, respectivamente. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com três repetições. Cada parcela experimental foi constituída por cinco plantas, considerando a área útil as três plantas centrais.

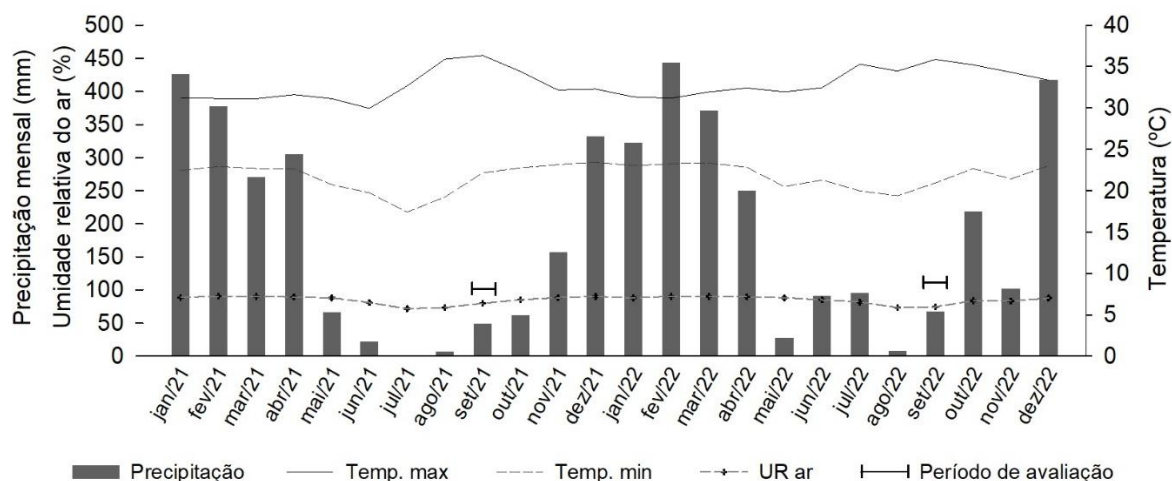
2.3 Manejo da Irrigação

As tensões de água no solo foram manejadas por sistema de irrigação localizada por gotejamento, com emissores autocompensantes. Utilizou-se emissores com vazão de 7,5 L h⁻¹, espaçados em 30 cm. O sistema foi pressurizado por conjunto motobomba elétrico, com linhas principal, de derivação e laterais de diâmetro nominal de 75, 50 e 16 mm, respectivamente. Para a determinação da lâmina a ser aplicada, amostras indeformadas de solo foram coletadas na profundidade de 30 cm e enviadas ao laboratório de análises de solos. Foram obtidos o potencial matricial e a umidade do solo associados às tensões de 1, 3, 10, 30, 50, 100 e 1500 kPa, possibilitando ajustar a curva de retenção da água no solo conforme modelo desenvolvido por Genuchten (1980). Como capacidade de campo (CC), foi estabelecido a tensão de 10 kPa.

A irrigação foi realizada entre os meses de maio a setembro. O monitoramento das tensões da água no solo foi realizado através de sensores de resistência elétrica com amplitude de leitura de 0 a 199 kPa, instalados na área central do experimento, na profundidade de 30 cm e à 10 cm da linha lateral de irrigação e da planta, conforme a recomendação de Ferrão *et al.* (2017). A irrigação foi iniciada sempre quando a média dos sensores atingia os valores estabelecidos dos tratamentos, até que a tensão retornasse à CC. O tempo de irrigação foi calculado considerando a curva de retenção ajustada para a área

experimental. Foram utilizados os dados climatológicos obtidos da estação meteorológica automática localizada próxima à fazenda experimental (Figura 1).

Figura 1. Precipitação mensal, umidade relativa do ar (URar) e temperatura do ar máxima e mínima durante o período experimental.



Estação climática D4033 Rio Branco - Igarapé Judia - AC (Instituto Nacional de Meteorologia, 2024).

O volume de chuvas acumuladas durante o período de avaliação (setembro) foi de 49,4 mm e 67,5 mm no primeiro e segundo ano, respectivamente, os quais estão dentro dos valores médios históricos da região. As tensões, no tratamento sem irrigação ficaram, em média, em 160 kPa.

2.4 Amostragem e Avaliações

2.4.1 Trocas gasosas

Em uma planta de cada parcela foram avaliadas as trocas gasosas através de um sistema portátil de determinações de trocas de gases de fluxo aberto (IRGA Modelo LI-6400XT, LI-COR, Lincoln, NE, USA). Utilizou-se densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD) de $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, concentração de CO_2 referência de $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$, temperatura do bloco na câmara foliar fixada em 30°C e condição ambiente de déficit de pressão de vapor (DPV).

Foram determinados a taxa de assimilação de CO_2 (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$); taxa de transpiração foliar (E) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$); condutância estomática ao vapor de água (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$); e pressão parcial de CO_2 (C_i) (Pa). A partir da relação A/E ($\mu\text{mol de CO}_2/\text{mmol de H}_2\text{O}$) foi calculada a eficiência de uso da água (EUA) e, da relação A/C_i , ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$) a eficiência de carboxilação instantânea (EC). As avaliações ocorreram no período da manhã, entre 8:00 e 12:00 h, em folhas completamente expandidas e em perfeito estado fitossanitário, localizadas no terço superior da planta.

2.4.2 Fluorescência da Clorofila-a

Os dados de fluorescência da clorofila-a foram obtidos com um fluorômetro (modelo LI-6400-40, Licor, USA) integrado ao IRGA. As medições foram efetuadas juntamente com as análises de trocas gasosas em folhas adaptadas à luz ou previamente adaptadas ao escuro durante 30 minutos, com o auxílio de lâminas de papel alumínio. Realizou-se o registro inicial de fluorescência de clorofila adaptada ao escuro (F_o) e, após iluminação com pulso de luz branca saturante com PPFD de 8000 $\mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 0,7 s, foi mensurada a fluorescência máxima (F_m). Nas folhas adaptadas à luz, um pulso de luz branca saturante (8000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; 0,7 s) foi aplicado para atingir a fluorescência máxima aclimatada à luz (F_m'). Posteriormente, foi registrado o valor de rendimento de fluorescência em estado estacionário (F_s) e, após retirada da luz actínica, mantendo iluminação com feixes de medição de modulação fraca em vermelho-distante, obteve-se a fluorescência mínima (F_o'). Para maximizar a abertura estomática toda a luz foi fornecida por uma combinação de emissores de luz vermelha e azul, definido para 10% azul.

A partir dos dados registrados, foram então determinados: a eficiência quântica máxima do fotossistema II (PSII) [$F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$]; eficiência quântica operacional do PSII [$\Phi_{PSII} = (F_m' - F_s)/F_m'$]; coeficiente de extinção fotoquímica [$qP = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_o')$]; coeficiente de extinção não-fotoquímica [$NPQ = (F_m - F_m')/F_m'$]; e taxa aparente de transporte de elétrons para o PSII [$ETR = ((F_m' - F_s)/F_m') \times f \times I \times \alpha_{folha}$], sendo f a fração de quanta absorvido que é distribuída para o PSII, tipicamente assumido ser a constante 0,5; I a densidade de fluxo de fótons incidente (1200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); e α_{folha} a constante para a fração de luz absorvida pelas folhas, dado como 0,85. Adicionalmente, a partir da relação ETR/A ($\mu\text{mol e}^- \mu\text{mol}^{-1} \text{CO}_2$) foi calculado o excesso de energia (ExC).

2.4.3 Pigmentos Fotossintéticos

Os teores de clorofilas-a (Chl_a), b (Chl_b), clorofila total (Chl_{total}) e carotenoides (Car) foram determinados pelo método de extração usando acetona 80%, conforme metodologia de Lichtenthaler e Welburn (1983). Pequenos fragmentos foliares de $\cong 0,05\text{g}$ foram inseridos em tubos de ensaio contendo 5 mL de acetona a 80%, protegidos da luz. Estes foram mantidos por 72 horas, a 25°C. A leitura da absorbância com espectrofotômetro foi efetuada nos comprimentos de onda de 663 nm e 647 nm para determinação das clorofilas a e b , respectivamente, e 470 nm para os carotenoides. Os teores (mg/g de massa fresca) foram determinados calculando: $Chl_{total} = (17,3 \times A_{647} + 7,18 \times A_{663})$; $Chl_a = (12,21 \times A_{663} - 2,81 \times A_{647})$; $Chl_b = (20,13 \times A_{647} + 5,03 \times A_{663})$; e $Car = ((1000 \times A_{470}) - (3,27 \times [Chl_a]) - (104 \times [Chl_b]))/229$.

2.4.4 Conteúdo Relativo de Água e Dano de Membrana

O conteúdo relativo de água (CRA) foi determinado através da metodologia proposta por Cairo (1995). Discos foliares ($\cong 100 \text{ mg}$), obtidos das mesmas folhas utilizadas nas análises anteriores, foram pesados em balança analítica para determinação da massa fresca (MF). Em seguida, foram colocados em placas de Petri contendo 10 mL de água destilada e mantidos à temperatura de 4°C durante 48h.

Após este período, os discos foram retirados, o excesso de água foi retirado com o uso de papel toalha e submetidos a uma nova pesagem, para obtenção da massa túrgida (MT). Para obter a massa seca (MS), os discos foliares foram submetidos à secagem em estufa de circulação de ar forçado a 65°C até atingirem massa constante. O *CRA* foi determinado pela equação: $CRA = [(MF-MS)/(MT-MS)] \times 100$.

O grau de dano de membrana (*DM*), que indica a ocorrência de estresse oxidativo, foi estimado a partir do extravasamento de eletrólitos. Amostras de tecido foliar ($\cong 1 \text{ cm}^2$), provenientes das mesmas folhas utilizadas nas análises anteriores, foram inseridas em tubos de ensaio contendo 10 mL de água destilada à 25°C, durante 48 h. Por meio de condutivímetro de bancada foi verificada a condutividade elétrica da suspensão (C1). As amostras foram colocadas em banho-maria a 100°C por 1 h e, após resfriamento, foi efetuada a segunda leitura (C2). O *DM* foi determinado pela metodologia proposta por Cavalcante *et al.* (2004), onde, $DM (\%) = (C1/C2) \times 100$.

2.4.5 Metabólitos

Para obtenção do extrato aquoso utilizou-se fragmentos de material foliar seco, obtidos das mesmas folhas utilizadas nas análises anteriores. Após macerado, realizou-se a extração por aquecimento em banho-maria a 100°C por 1 h. Armazenou-se o extrato final sob refrigeração, a 4°C.

Os teores de aminoácidos solúveis totais (*AST*) foram determinados segundo Yemm e Cocking (1955). Em 650 µL do tampão citrato (0,2 M, pH 5,0; NaOH 1,0 M) e 100 µL do extrato aquoso foi adicionado 600 µL do reagente revelador (ninhidrina 5% + KCN 0,2 mM). Após agitação, foram mantidos em banho-maria por 15 minutos, a 100°C, seguido por resfriamento. Foi adicionado 650 µL de etanol 60% e a leitura realizada em espectrofotômetro à 570 nm.

Para determinação dos teores de prolina livre (*Pro*) foi preparado solução contendo 1 mL do extrato aquoso bruto, 1 mL de ninhidrina ácida e 1 mL de ácido acético glacial. Esta foi levada a banho-maria por 1 h a 100°C. A reação foi interrompida por banho de gelo e adicionado 2 mL de tolueno. Após agitação, a fase menos densa foi aspirada e feita leitura em espectrofotômetro à 520 nm, conforme Bates (1973).

Os teores de amido e carboidratos solúveis totais (*CST*) foram obtidos pelo método de Dubois *et al.* (1956). Para determinação dos *CST*, foram adicionados 500 µL de solução fenol 5% e 2,5 mL de ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄) em 500 µL de extrato aquoso bruto. Após agitação, foram mantidos em repouso por 10 min para a leitura em espectrofotômetro à 490 nm. Para determinação do amido, utilizou-se extração ácida do material vegetal. Amostras de 50 mg de material macerado imersos em 7 mL de água deionizada foram mantidos em banho-maria por 1 h a 100°C. A extração foi realizada duas vezes e os sobrenadantes descartados. Mais duas extrações foram realizadas com o resíduo resultante utilizando 2,5 mL de HClO₄ 30% por 30 min a 25°C. Ao final, os dois sobrenadantes foram reunidos para obtenção do extrato final (5 mL). A determinação seguiu a metodologia descrita, com leitura em espectrofotômetro à 490 nm.

As concentrações dos carboidratos, amido, prolina e aminoácidos livres foram calculadas tendo como referência a equação obtida para a curva padrão previamente realizada, expressa em $\mu\text{mol g}^{-1}$ de MF.

2.5 Análises Estatísticas

O teste de Shapiro-Wilk ($p \leq 0,05$) foi usado para avaliar a normalidade dos dados, seguido pela análise de variância (ANOVA) ($p \leq 0,05$). As médias significativas foram comparadas pelo teste t de Fisher (LSD) ($p \leq 0,05$), usando o software Sisvar 5.6 (FERREIRA, 2014). As análises de Correlação de Pearson e PCA foram processadas pela média de cada combinação de tratamento, utilizando o programa RStudio (R Core Team, 2021).

3 RESULTADOS

O resumo da análise de variância mostra o efeito isolados dos tratamentos de tensões de água no solo e clones de cafeeiro canéfora (Tabela S1 e S2 - material suplementar). A interação tensões \times clones não foi significativa para nenhuma das variáveis avaliadas ($P < 0,05$).

3.1 Trocas gasosas

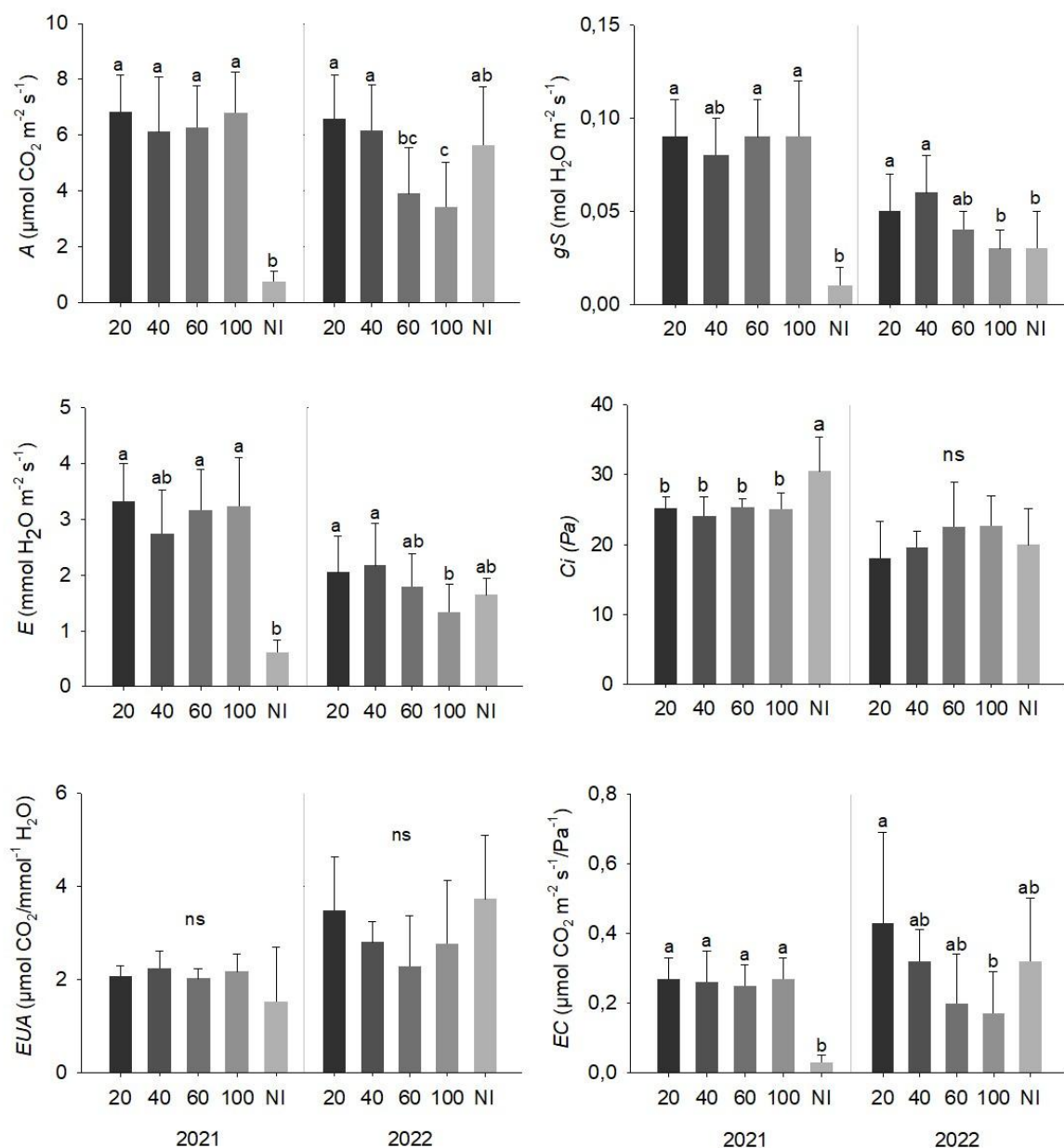
No primeiro ano de avaliação, A , gS e E foram menores quando os cafeeiros foram cultivados sem irrigação (Figura 2). Uma pequena redução na gS e, conseqüentemente, na E , foi observada no tratamento de 40 kPa. Ainda no primeiro ano, as variações nas tensões de água no solo não resultaram em diferenças na eficiência do uso da água. Entretanto, as variações de A e C_i resultaram em valores significativamente menores de EC no tratamento não irrigado (NI). No segundo ano, os tratamentos de 20 e 40 kPa apresentaram maior A , gS e E , embora a A destes tratamentos não diferir do NI.

As cultivares BRS 1216, 3210 e 3220 apresentaram no primeiro ano maior A , acoplada à maior gS , E e C_i (Tabela 1). Os menores valores foram observados para a cultivar BRS 2314. No segundo ano as variações na gS resultaram em diferenças na E e C_i , porém sem efeito na A , sendo maior para BRS 1216.

3.2 Fluorescência da clorofila

Em 2021, os maiores valores de F_v/F_m , $\Phi PSII$, qP e ETR foram observados nos cafeeiros cultivados com irrigação, independentemente da tensão de água no solo, enquanto a razão ETR/A , expressa pelo ExC , foi maior nas plantas cultivadas em NI (Figura 3). Neste ano, a cultivar BRS 3210 exibiu maior F_v/F_m . Menores valores de qP foram observados na BRS 1216 (Tabela 1). No ano seguinte, o tratamento de 20 kPa diferiu dos demais com maior F_v/F_m , enquanto $\Phi PSII$, qP e ETR foram maiores sob 60 kPa. A cultivar BRS 3220 apresentou os menores valores de F_v/F_m . Já para $\Phi PSII$, qP , ETR e ExC , os valores nas plantas cultivadas sob tensão de 60 kPa foram significativamente maiores. NPQ não variou em função das tensões de água no solo.

Figura 2. Taxa fotossintética (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E), concentração interna de CO_2 (C_i), eficiência do uso da água (EUA) e eficiência de carboxilação (EC) em cultivares de *Coffea canephora* cultivadas sob tensões de água no solo de 20, 40, 60 e 100 kPa e sem irrigação (NI), nos anos de 2021 e 2022.



Médias seguidas de letras distintas, dentro de cada ano, indicam diferença significativa pelo teste de t de Fisher (LSD) ($P < 0,05$).

3.3 Pigmentos Fotossintéticos

Os teores de clorofila-a, clorofila-b e carotenoides foram significativamente menores em plantas jovens de café cultivadas sem irrigação, como observado em 2021 (Figura 4). Com isso, o teor de clorofilas totais nessas plantas também foi menor. Por outro lado, a relação clorofila a/b aumentou, indicando maior redução desta última nas folhas de café sob déficit. A cultivar BRS 3220 apresentou menores teores de clorofila-b e, com isso, maior relação clorofila a/b (Tabela 2).

Tabela 1. Valores médios de fotossíntese (*A*), condutância estomática (*gS*), transpiração (*E*), concentração interna de CO₂ (*Ci*), eficiência do uso da água (*EUA*), eficiência de carboxilação (*EC*), eficiência quântica potencial do PSII (*Fv/Fm*), eficiência quântica operacional do PSII (*ΦPSII*), coeficiente de extinção fotoquímica (*qP*), coeficiente de extinção não-fotoquímica (*NPQ*), taxa de transporte de elétrons (*ETR*) e excesso de energia (*ExC*) de cultivares de *Coffea canephora*, nos anos de 2021 e 2022.

CULTIVAR	2021											
	<i>A</i>	<i>gS</i>	<i>E</i>	<i>Ci</i>	<i>EUA</i>	<i>EC</i>	<i>Fv/Fm</i>	<i>ΦPSII</i>	<i>qP</i>	<i>NPQ</i>	<i>ETR</i>	<i>ExC</i>
BRS 1216	5,85ab	0,09a	3,03a	28,11a	1,94	0,22ab	0,78ab	0,095	0,15c	1,17	48,63	11,12
BRS 2299	5,12bc	0,06bc	2,48b	25,77bc	2,03	0,21abc	0,76bc	0,109	0,20a	1,38	54,33	13,13
BRS 2314	4,11c	0,04c	1,93c	24,36c	2,04	0,17c	0,77abc	0,106	0,20a	1,70	54,21	15,43
BRS 3210	6,16a	0,08ab	2,91ab	26,23ab	2,14	0,25a	0,80a	0,116	0,19ab	1,35	57,69	12,48
BRS 3213	5,04bc	0,07b	2,52ab	25,48bc	1,97	0,20bc	0,78abc	0,101	0,15bc	1,13	50,19	14,54
BRS 3220	5,90ab	0,07ab	2,82ab	26,16bc	1,91	0,24ab	0,75c	0,112	0,20a	1,48	57,18	15,15
CULTIVAR	2022											
	<i>A</i>	<i>gS</i>	<i>E</i>	<i>Ci</i>	<i>EUA</i>	<i>EC</i>	<i>Fv/Fm</i>	<i>ΦPSII</i>	<i>qP</i>	<i>NPQ</i>	<i>ETR</i>	<i>ExC</i>
BRS 1216	5,73	0,062a	2,24a	22,75a	2,75	0,276	0,776a	0,079	0,134	1,08ab	40,10	8,12
BRS 2299	5,56	0,048b	1,92ab	21,11ab	3,11	0,294	0,782a	0,080	0,128	0,88b	40,70	8,50
BRS 2314	4,97	0,039b	1,68b	19,13bc	2,97	0,293	0,784a	0,078	1,138	1,34a	39,84	9,58
BRS 3210	5,05	0,040b	1,52b	18,37c	3,38	0,349	0,771a	0,075	0,133	1,47a	38,19	9,20
BRS 3213	4,81	0,036b	1,55b	21,26ab	3,12	0,267	0,787a	0,064	0,104	0,91b	32,68	8,29
BRS 3220	4,80	0,043b	1,88ab	20,86abc	2,74	0,262	0,733b	0,063	0,123	1,43a	32,26	8,06

Letras distintas na coluna, dentro de cada ano, indicam diferença entre as médias pelo teste de t de Fisher (P<0,05).

Tabela 2. Valores médios dos teores de Clorofila-a (*Chl_a*), Clorofila-b (*Chl_b*), clorofila_{total} (*Chl_{total}*), relação clorofila a/b (*Chl a/b*), carotenoides (*Car*), dano de membrana (*DM*), conteúdo relativo de água (*CRA*), carboidratos solúveis totais (*CST*), aminoácidos solúveis totais (*AST*) e prolina (*Pro*) em clones de *Coffea canephora*, nos anos de 2021 e 2022.

CULTIVAR	2021										
	<i>Chl_a</i>	<i>Chl_b</i>	<i>Chl_{total}</i>	<i>Chl a/b</i>	<i>Car</i>	<i>DM</i>	<i>CRA</i>	<i>CST</i>	<i>Amido</i>	<i>AST</i>	<i>Pro</i>
BRS 1216	5,01	3,13a	7,83	1,82ab	0,28	34,20a	75,90	865,53	251,91	384,44	209,53c
BRS 2299	5,22	3,38a	8,61	1,73b	0,27	27,65b	79,99	764,89	260,85	499,30	280,38a
BRS 2314	4,65	2,82ab	7,47	1,76b	0,30	28,64ab	78,94	768,97	286,66	485,14	260,41ab
BRS 3210	4,73	2,83ab	7,39	1,71b	0,32	25,51b	78,54	824,71	274,39	469,58	210,76c
BRS 3213	5,06	3,13a	8,19	1,69b	0,32	26,66b	78,39	794,64	267,80	410,69	228,83bc
BRS 3220	4,20	2,10b	6,41	2,08a	0,26	25,17b	79,18	800,71	249,78	514,86	264,32ab
CULTIVAR	2022										
	<i>Chl_a</i>	<i>Chl_b</i>	<i>Chl_{total}</i>	<i>Chl a/b</i>	<i>Car</i>	<i>DM</i>	<i>CRA</i>	<i>CST</i>	<i>Amido</i>	<i>AST</i>	<i>Pro</i>
BRS 1216	2,78bc	1,67b	4,45b	1,71	0,28d	18,63	72,08	970,92abc	371,74ab	782,22	99,50b
BRS 2299	3,40a	2,14a	5,53a	1,62	0,34a	15,57	76,53	922,34c	268,79c	882,85	116,11a
BRS 2314	3,12ab	2,06a	5,18a	1,58	0,33ab	17,59	72,07	1014,75a	376,35ab	780,76	111,20ab
BRS 3210	2,71bc	1,65b	4,35b	1,68	0,31bcd	15,57	76,84	1009,50a	290,67c	798,54	108,42ab
BRS 3213	2,77bc	1,70b	4,47b	1,62	0,32abc	16,43	72,79	948,65bc	364,11b	912,64	101,90b
BRS 3220	2,33c	1,36c	3,69c	1,71	0,30cd	17,41	74,53	998,87ab	435,46a	816,53	86,11c

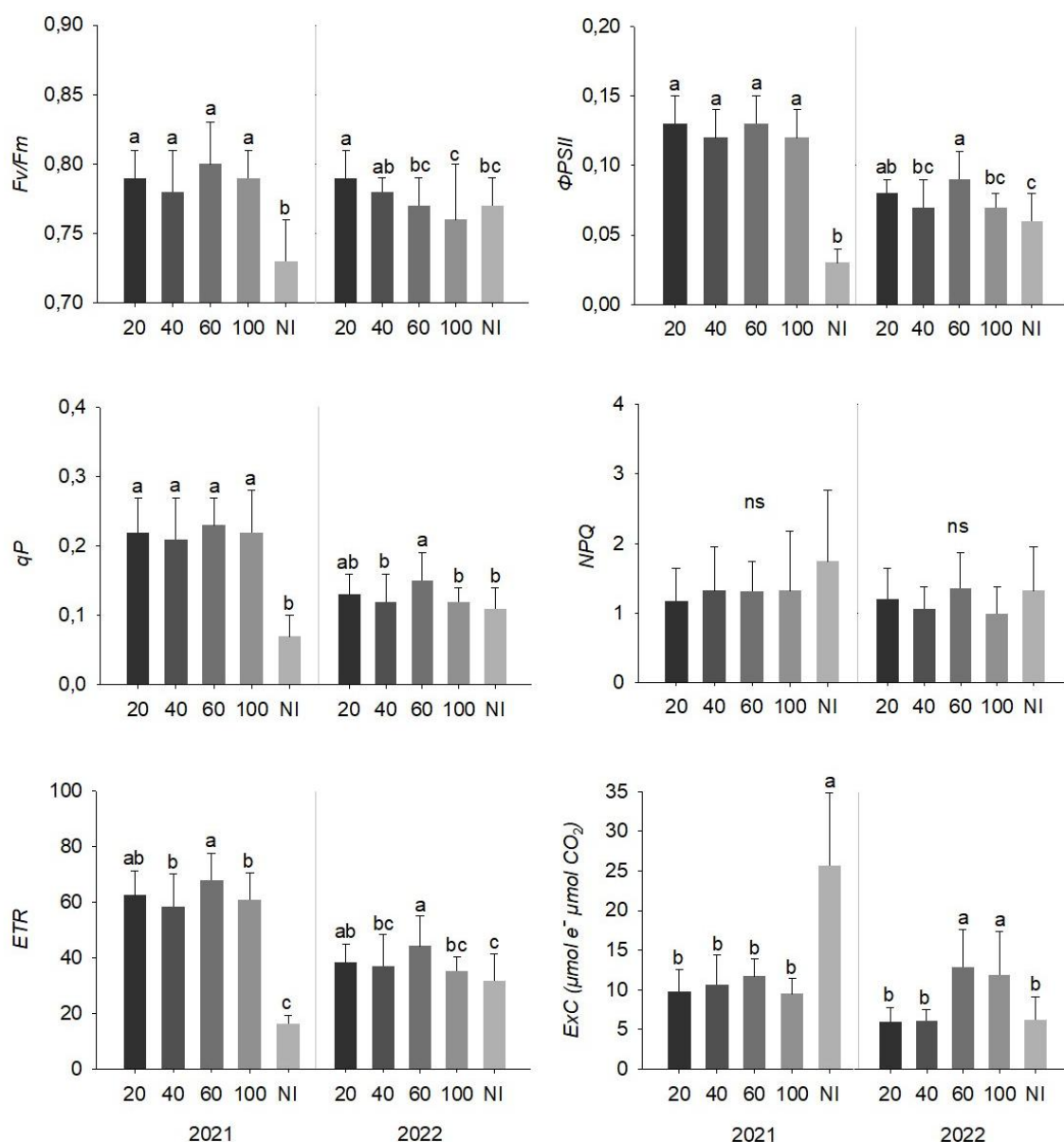
Letras distintas na coluna, dentro de cada ano, indicam diferença entre as médias pelo teste t de Fisher (LSD) (P<0,05).

Em 2022 não foi observado diferença nos teores destes pigmentos em função das diferentes tensões de água no solo. A cultivar BRS 2299 obteve maiores teores de *chl_a*, *chl_b*, *chl_{total}* e *Car* em relação às demais. A cultivar BRS 2314 também se destacou quanto aos teores de *chl_b* e *chl_{total}*.

3.4 Conteúdo Relativo de Água e Dano de Membrana

Não houve variação no *CRA* nas folhas dos cafeeiros em função das diferentes tensões de água no solo, nos dois períodos avaliados (Figura 5). Quanto menor a tensão de água no solo, maior foi o *DM* observado em plantas jovens de café, na avaliação realizada em 2021. Neste período, a cultivar BRS 1216 apresentou maior *DM* (Tabela 2).

Figura 3. Eficiência quântica potencial do PSII (*Fv/Fm*), eficiência quântica operacional do PSII (*ΦPSII*), coeficiente de extinção fotoquímica (*qP*), coeficiente de extinção não-fotoquímica (*NPQ*), taxa de transporte de elétrons (*ETR*) e excesso de energia (*ExC*) em clones de *Coffea canephora* cultivados sob tensões de água no solo de 20, 40, 60 e 100 kPa e sem irrigação (NI), nos anos de 2021 e 2022.

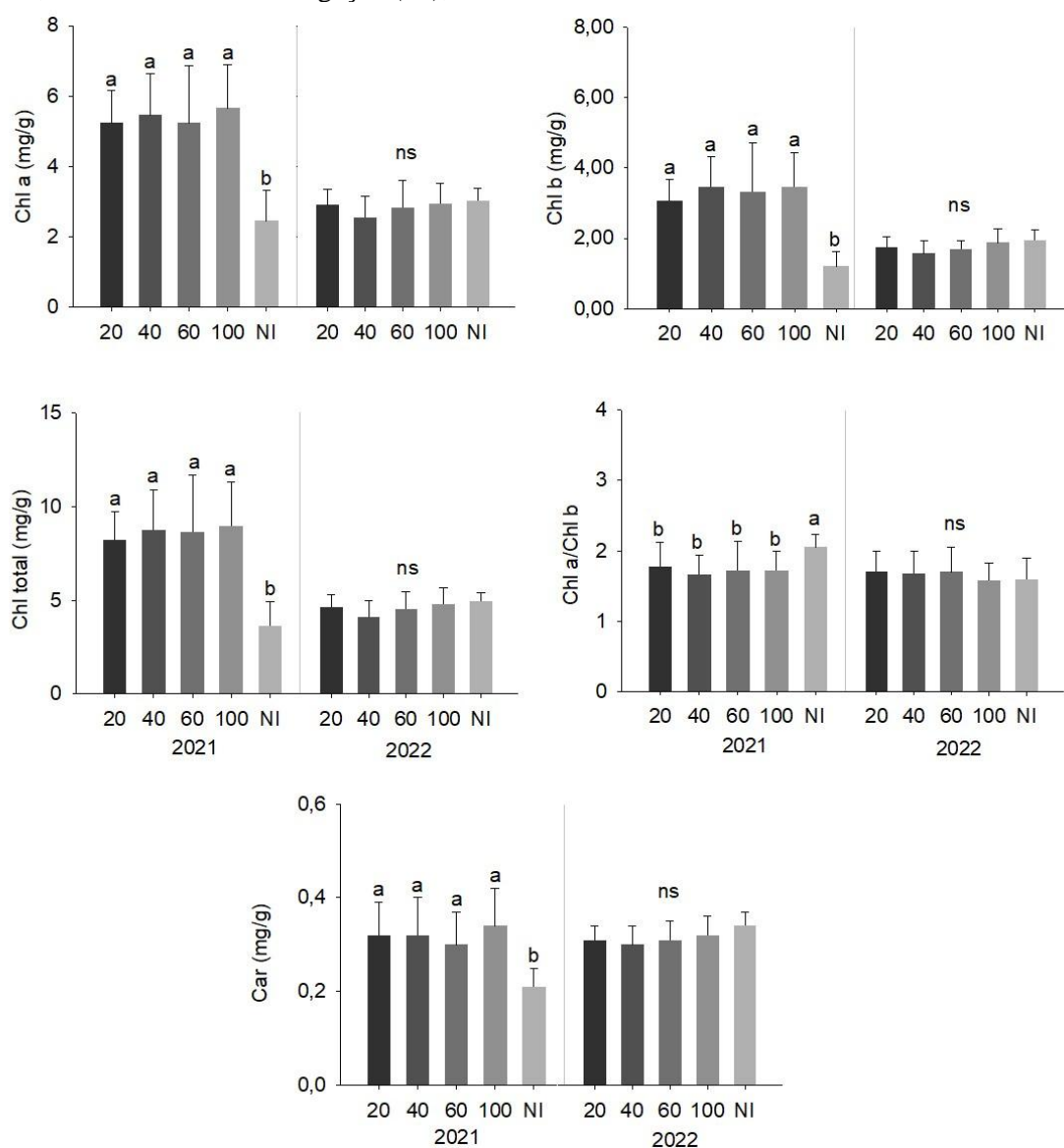


Médias seguidas de letras distintas, dentro de cada ano, indicam diferença significativa pelo teste t de Fisher (LSD) ($P < 0,05$).

3.5 Metabólitos

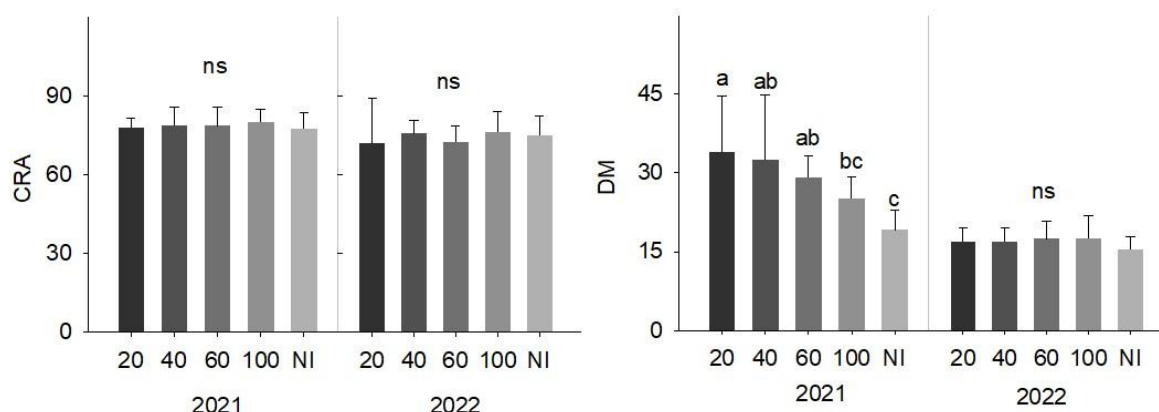
Houve variação nos teores de *CST* nos dois períodos de avaliação (Figura 6). No primeiro ano, os teores foram significativamente maiores em plantas de café não irrigadas, enquanto no segundo, a irrigação foi favorável ao acúmulo deste metabólito nas folhas, independente da tensão aplicada. Os teores de amido das folhas de café variaram apenas em 2022, sendo maior sob menor tensão de água no solo, 20 e 40 kPa. As cultivares BRS 2299 e BRS 3210 apresentaram os menores teores deste metabólito e, a cultivar BRS 3220 os maiores teores (Tabela 2). Em 2021, os teores de *AST* e *Pro* foram inferiores em plantas sem irrigação, enquanto em 2022 não houve diferenças entre as tensões. Maior teor de *Pro* foi observado na cultivar BRS 2299, em ambos os períodos (Tabela 2).

Figura 4. Teores de Clorofila-a (Chl_a), Clorofila-b (Chl_b), clorofila total (Chl_{total}), relação clorofila a/b ($Chl\ a/b$) e carotenoides (Car), em clones de *Coffea canephora* cultivados sob tensões de água no solo de 20, 40, 60 e 100 kPa e sem irrigação (NI), nos anos de 2021 e 2022.



Médias seguidas de letras distintas, dentro de cada ano, indicam diferença significativa pelo teste de t de Fisher (LSD) ($P < 0,05$).

Figura 5. Conteúdo relativo de água (*CRA*) e dano de membrana (*DM*) em clones de *Coffea canephora* cultivados sob tensões de água no solo de 20, 40, 60 e 100 kPa e sem irrigação (NI), nos anos de 2021 e 2022.



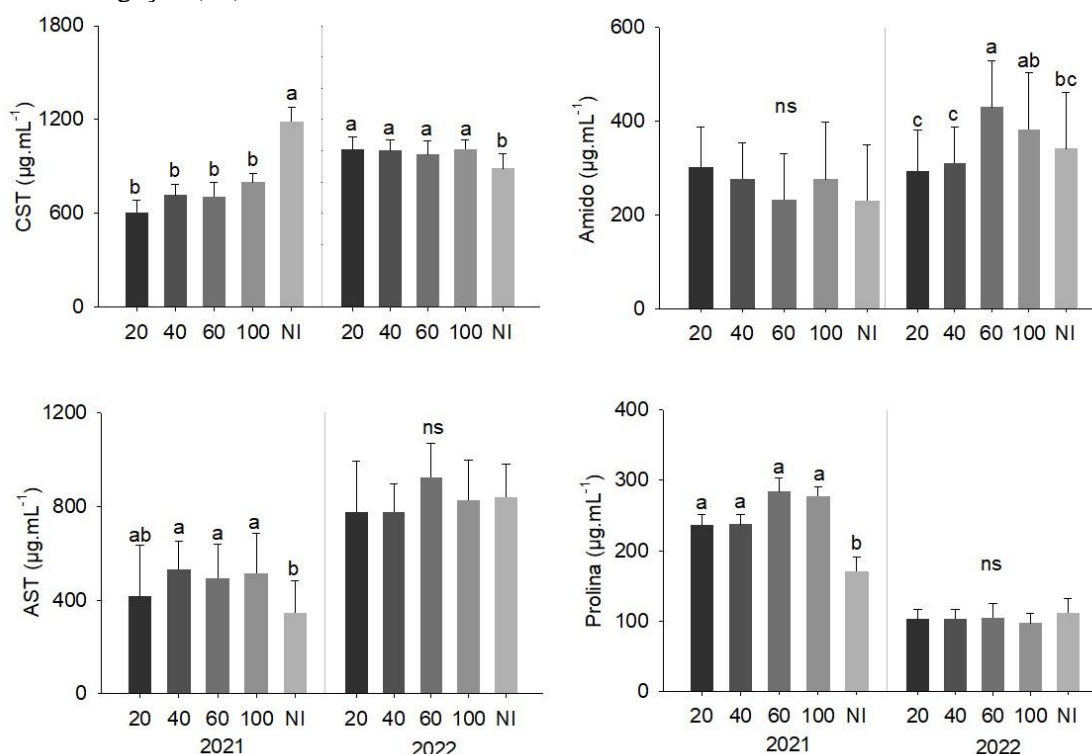
Médias seguidas de letras distintas, dentro de cada ano, indicam diferença significativa pelo teste t de Fisher (LSD) ($P < 0,05$).

4 DISCUSSÃO

Sob estresse hídrico, os cafeeiros jovens mostraram reduzida *gS* e, por sua vez, os demais parâmetros de trocas gasosas possivelmente foram diretamente influenciados por esta variação. As taxas transpiratórias das plantas foram totalmente influenciadas pela *gS*. Com isso, os valores de *EUA* foram independentes das diferentes tensões de água no solo ou cultivares. O cafeeiro é caracterizado por possuir uma condutância estomática estreita e um controle eficiente do status hídrico (MARTINS *et al.*, 2019; SEMEDO *et al.*, 2021). A *gS* mostrou ser um mecanismo importante das plantas de cafeeiros canéfora na adaptação às condições adversas. Tal estratégia pode ter sido um fator chave para a manutenção do *CRA* nas folhas das plantas não irrigadas. Segundo Deuner *et al.* (2011), a redução da *gS*, quando as folhas ainda estão túrgidas, mostra que os estômatos do cafeeiro participam ativamente do processo de redução das perdas hídricas, iniciando seu fechamento aos primeiros sinais de restrição hídrica.

Além da redução da disponibilidade hídrica no solo, as variações na *gS* e, consequentemente, nos demais parâmetros fotossintéticos são influenciados pelas condições climáticas adversas para o cafeeiro. Em setembro, mês em que as avaliações deste experimento foram realizadas, as condições climáticas da região são desfavoráveis à cultura (CUSTÓDIO *et al.*, 2022; RODRIGUES *et al.*, 2018). Durante este período observam-se, além da baixa precipitação, altas temperaturas e intensidade de radiação solar, associados à baixa UR do ar (Figura 1), o que resulta em aumento significativo do déficit de pressão de vapor do ar (DPV) (CUSTÓDIO *et al.*, 2022; RODRIGUES *et al.*, 2016). Com isso, as plantas têm sua condutância significativamente reduzidas para minimizar as perdas de água pela transpiração. Ou seja, a sensibilidade estomática do cafeeiro é influenciada tanto pelas variações hídricas no solo quanto na atmosfera (DEUNER *et al.*, 2011). A expressiva redução da *A* em plantas não irrigadas resultou em um acúmulo de CO_2 no espaço intercelular foliar, ou seja, houve menor consumo de carbono. Neste caso, a

Figura 6. Teores de carboidratos solúveis totais (CST), amido, aminoácido solúveis totais (AST) e prolina (Pro) em clones de *Coffea canephora* cultivados sob tensões de água no solo de 20, 40, 60 e 100 kPa e sem irrigação (NI), nos anos de 2021 e 2022.



Médias seguidas de letras distintas, dentro de cada ano, indicam diferença significativa pelo teste de t de Fisher (LSD) ($P < 0,05$).

disponibilidade do substrato não foi suficiente para manter as taxas fotossintéticas, o que indica que a A dessas plantas foi limitada por fatores não estomáticos, tal hipótese reforçada pela menor *EC*. Ressalta-se que, no primeiro ciclo avaliativo, as plantas lidaram com maior estresse, tendo em vista o maior déficit hídrico neste período (Figura 1).

No segundo ano, as variações na tensão de água no solo parecem ter menos influência sobre o desempenho fotossintético das plantas. Mesmo sob baixa condutância, a A foi aumentada no tratamento de maior estresse hídrico. Isto mostra a importância da fenologia da planta de café sobre seu comportamento fisiológico, aqui estudado em condições de campo durante duas fases distintas, plantas jovens e adultas. No primeiro ano, as plantas jovens, que estão em rápido crescimento, apresentavam parte aérea (PA) bem desenvolvida, porém, possivelmente maior em relação ao sistema radicular (SR). Nesta condição, as plantas são fortemente afetadas pela restrição hídrica, tendo em vista as taxas de perda de água em detrimento à aquisição. Após o reestabelecimento das chuvas, um maior desenvolvimento do SR de plantas pré-estressadas pode ser o ponto chave para maior tolerância. No segundo ano de avaliação, após a primeira safra comercial, a relação PA/SR é reduzida pela poda de produção, contribuindo ainda mais com o ajuste da relação hídrica (menor perda de água associada à maior capacidade de absorção). As plantas de café conilon não irrigadas apresentam maior área superficial e comprimento e volume de raízes por volume de solo nas camadas superior e subterrânea

em comparação às plantas irrigadas (COVRE *et al.*, 2015). Portanto, as plantas que sofreram estresse hídrico têm aumento nas raízes e essa compensação radicular promove melhor absorção e aproveitamento de água e nutrientes (SOLIMÕES *et al.*, 2023). Tal característica pode integrar o conjunto de mecanismos que possibilita melhor desempenho das plantas após ciclos de déficit hídrico (memória do estresse).

As plantações de café não só resistem satisfatoriamente a períodos prolongados de seca, mas também recuperam muito rapidamente após o fim deste período (COVRE *et al.*, 2015; MARTINS *et al.*, 2019). O cafeeiro é conhecido por possuir crescimento compensatório pós-seca, o qual é estimulado quando as tensões hídricas são liberadas (SOLIMÕES *et al.*, 2023). No restabelecimento do crescimento RONCHI e DaMATTA (2017) citam uma taxa de crescimento nessas plantas 20% superior. Talvez isso contribua com a pronunciada bienalidade de canéforas em cultivo de sequeiro. O sistema radicular do cafeeiro conilon também pode ser afetado pela carga pendente. Segundo estes autores, em anos de carga elevada, há o esgotamento da planta e o consequente comprometimento (morte) do sistema radicular, afetando a safra seguinte.

O desempenho fotoquímico das plantas jovens de café também foi afetado pelo estresse hídrico, sendo observado forte correlação entre as variáveis de trocas gasosas (Figura 8). O $\Phi PSII$ fornece informações sobre a energia absorvida que é direcionada para a fotoquímica a nível de PSII, e seu declínio pode ser um mecanismo que ajusta a eficiência do PSII à densidade de fluxo de fótons fotossintéticos. O $\Phi PSII$ depende também da atividade de reações bioquímicas consumidoras de energia, como a assimilação de CO₂ (GUIDI *et al.*, 2019). Como nos cafeeiros jovens não irrigados o uso da energia foi reduzido pela menor atividade fotossintética, o ajuste foi necessário para evitar possíveis danos por excesso de energia. Os menores valores de *ETR* nessas plantas acompanha tal mecanismo. A capacidade máxima de dissipação de energia pela fluorescência também foi reduzida sob estresse. O *Fv/Fm* representa uma estimativa da eficiência fotoquímica máxima do PSII, no qual a luz é absorvida pelo PSII e é usada para reduzir uma quinona. Também pode ser usado como medida da integridade do PSII. O declínio dessa razão, que varia normalmente entre 0,75 e 0,85, é um bom indicador da fotoinibição do PSII induzida por um fator de estresse (GUIDI *et al.*, 2019; SOUZA *et al.*, 2020).

Os valores de *ExC* mostram que as plantas de cafeeiro jovens não irrigadas lidam com uma maior quantidade de energia em relação à quantidade de CO₂ absorvido do que as irrigadas. Tais plantas podem ser afetadas negativamente por essa maior energia. Um *ExC* mais alto indica um aumento da pressão oxidativa nos cloroplastos que pode levar ao estresse oxidativo e fotoinibição. Os elétrons em excesso, ao invés de serem utilizados para a redução de NADPH⁺, são transferidos para o oxigênio resultando na produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) (GUIDI *et al.*, 2019; MARÇAL *et al.*, 2021). O *ExC* se correlaciona negativamente com todas as variáveis, com exceção do *NPQ* (Figura 7). Um potencial aumento na pressão oxidativa poderia ser adequadamente neutralizado pelos ajustes na dissipação não fotoquímica do excesso de energia, *NPQ* (GUIDI *et al.*, 2019), o que não aconteceu nessas plantas. Isto mostra que o *NPQ* não é uma estratégia do café canéfora para dissipar o excesso de energia e evitar

danos nos fotossistemas. Os menores valores de qP sob estresse se somam às evidências (maiores Exc , menores Fv/Fm e $\Phi PSII$) que estas plantas se encontram sob fotoinibição. Por outro lado, pode indicar um possível ajuste da fase fotoquímica em resposta à menor assimilação de CO_2 , embora a metabolização dessa energia possa ser importante para a redução da pressão oxidativa. Nas plantas não irrigadas já em fase de produção, apesar da alta A , a eficiência fotoquímica continuou menor, porém, tais plantas não estavam lidando com excesso de energia. Já nos tratamentos de 60 e 100 kPa, os quais apresentaram baixa A , os maiores valores de ETR resultaram em um maior Exc . De forma geral, a menor fluorescência e transporte de elétrons no PSII ocorreu neste ano, em relação ao primeiro, indicando maior atividade fotoquímica dos cafeeiros durante a fase juvenil.

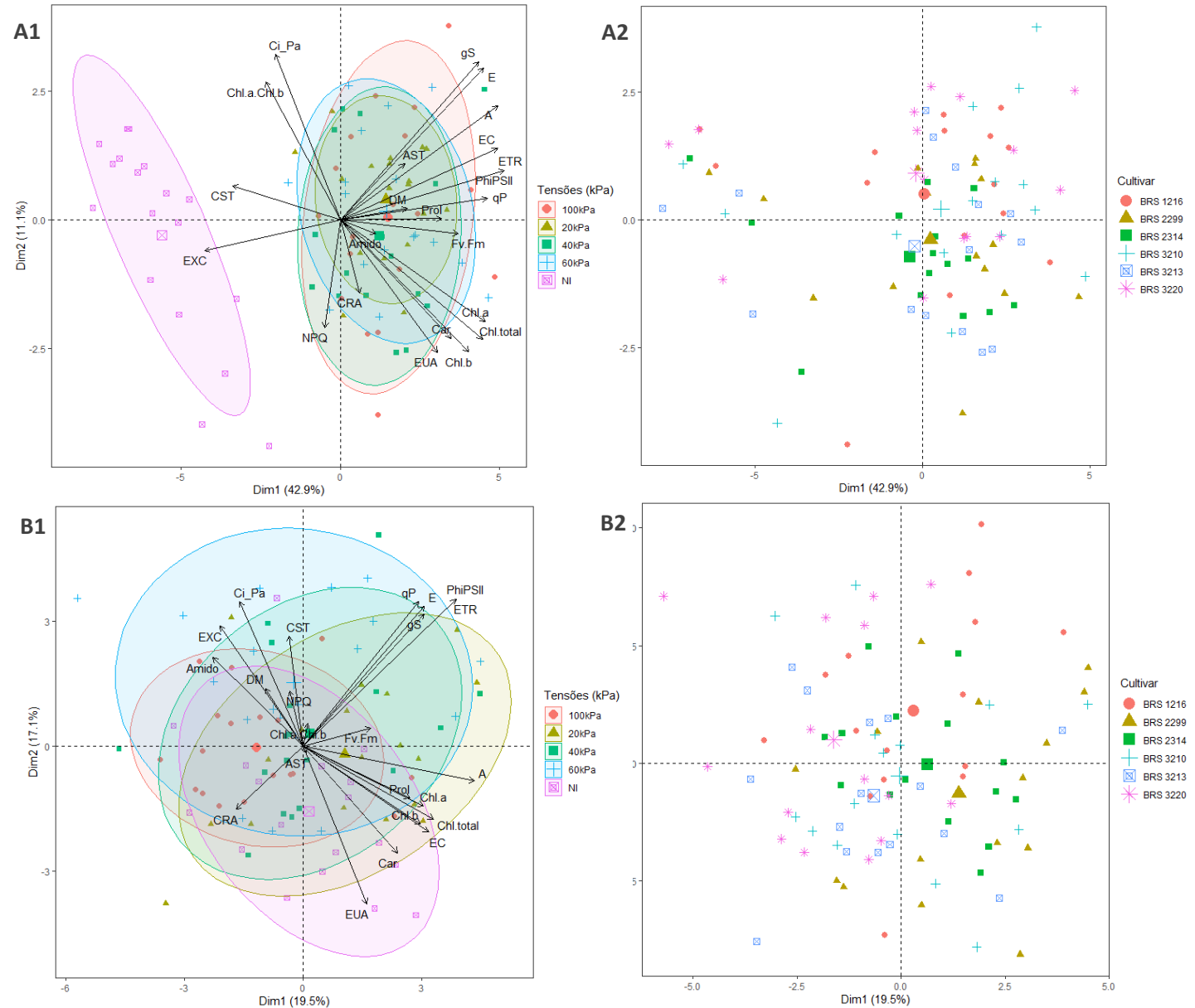
A mesma tendência ocorreu para os pigmentos fotossintéticos nas plantas em fase produtiva. Embora não havendo diferença nos teores de pigmentos em função dos tratamentos hídricos, menor quantidade de clorofila foi observada nessas plantas. O conteúdo reduzido de clorofila sugere que os cafeeiros tem um número menor de complexos antena para captação de luz. Na verdade, para reduzir a captação de energia e evitar uma sobrecarga no cloroplasto, as plantas podem diminuir o conteúdo de clorofila, o que ocorre pela inibição de sua biossíntese sob estresse hídrico moderado à severo (DaMATTA e RAMALHO, 2006). A correlação positiva dos teores de pigmentos com a fotossíntese e fluorescência fortalece tal hipótese, sobretudo no segundo ano, onde A teve maior relação com as variáveis de Chl . Na fase juvenil, apenas em cafeeiros não irrigados a redução dos teores dos pigmentos foi significativa. A relação clorofila a/b indica que a redução dos teores destes pigmentos foi proporcionalmente maior para esta última nas folhas de cafeeiros sob déficit. A cultivar BRS 3220, quando em ambiente com baixa disponibilidade de água no solo, apresenta amarelecimento generalizado (ESPINDULA *et al.*, 2019), justificável pelos seus baixos teores de clorofila foliar observados em nosso estudo.

A manutenção do CRA , mesmo sobre estresse hídrico, é uma condição interessante nestes cafeeiros. Na fase jovem, o CRA não se correlacionou com nenhuma variável estudada, enquanto na fase produtiva, uma correlação negativa é observada, inclusive, com a A e $\Phi PSII$. Em estudo com plantas jovens de *C. arabica*, Catarino *et al.* (2021) observaram que, mesmo a umidade do solo tendo diminuído drasticamente com o déficit hídrico, o potencial hídrico foliar dos cafeeiros diminuiu apenas para cerca de -1,0 MPa após 40 dias de retirada de água, o que representa para o café um estresse hídrico leve a moderado (MARTINS *et al.*, 2019; SEMEDO *et al.*, 2021).

O acúmulo de CST com a redução da disponibilidade hídrica parece desempenhar um papel importante na fase jovem dos cafeeiros sob esta condição, já que a A nessas plantas foi significativamente menor. Os carboidratos redutores compõem formas de carboidratos facilmente mobilizáveis para a produção de energia, que são altamente higroscópicos e apresentam ótima função osmorreguladora (SANCHES *et al.*, 2017; TOUNEKTİ *et al.*, 2018). Durante a fase produtiva, mesmo mantendo sua A , o teor deste metabólito é reduzido possivelmente devido seu direcionamento

Figura 7. Análise de Componentes Principais para a relação entre trocas gasosas, fluorescência da clorofila-a e teores de pigmentos fotossintéticos e metabólitos de clones de *Coffea canephora* cultivados sob diferentes tensões de água no solo, nos anos de 2021 (A1 e A2) e 2022 (B1 e B2).

Biplots contendo pontuações médias das duas primeiras componentes principais (CP1 e CP2). C1: BRS 1216; C2: BRS 2299; C3: BRS 2314; C4: BRS 3210; C5: BRS 3213; C6: BRS 3220; A: taxa fotossintética; gS: condutância estomática; E: transpiração; Ci: concentração interna de CO₂; EUA: eficiência do uso da água; EC: eficiência de carboxilação; Fv/Fm: eficiência quântica máxima do PSII; ΦPSII: eficiência quântica operacional do PSII; qP: coeficiente de extinção fotoquímica; NPQ: coeficiente de extinção não-fotoquímica; ETR: taxa de transporte de elétrons; ExC: excesso de energia; Chla: teores de clorofila-a; Chlb: clorofila-b; Chltotal: clorofila total; Chl a/b: relação clorofila a/b; Car: carotenoides; DM: dano de membrana; CRA: conteúdo relativo de água; CST: carboidratos solúveis totais; AST: aminoácidos solúveis totais; Pro: prolina.



para os frutos, que se tornam os drenos primários na planta (BOTE e JAN, 2016; COVRE *et al.*, 2022). Neste caso o acúmulo de amido, sob déficit moderado à severo, teria maior importância. A redução nos níveis de aminoácidos sob condições de déficit hídrico pode indicar baixo potencial osmorregulador das plantas nas quais, possivelmente, esta diminuição está associada ao consumo destes compostos para a manutenção de suas estruturas vegetativas e reprodutivas (SANCHES *et al.*, 2017).

A severidade do estresse variou pouco entre as cultivares, sobretudo na fase adulta, onde a *A* não diferiu entre as plantas. Mesmo com as variações na *gS*, as cultivares não diferiram em relação à *EUA*. A produtividade fotossintética da cultivar BRS 1216 se correlacionou com seu crescimento vegetativo, a qual se destaca das demais pela maior produção de massa seca e volume de raiz (ARAUJO *et al.*, 2021). Entre as cultivares, BRS 1216, BRS 3137, BRS 3193, BRS 3210 e BRS 3213 são caracterizadas por apresentar maior potencial produtivo em ambiente com restrições hídricas, enquanto as cultivares BRS 2299, BRS 2314, BRS 2357, BRS 2336 e BRS 3220 são as menos produtivas (ESPÍNDULA *et al.*, 2019). Neste trabalho, na fase juvenil, as cultivares BRS 1216 e BRS 3210 se destacaram pelos maiores valores de *A* e *E*, acoplados à uma maior *gS* e *Ci*, aliado à maior *Fv/Fm*.

5 CONCLUSÕES

O ajuste estomático e da absorção de luz no PSII mostraram ser importantes mecanismos dos cafeeiros canéforas para redução dos danos causados pelo estresse hídrico em condições de campo. Durante a fase juvenil, a taxa fotossintética e transpiratória é regulada pela expressiva sensibilidade estomática em plantas não irrigadas, enquanto na fase adulta a redução dos teores de pigmentos fotossintéticos auxilia na diminuição da absorção de luz em excesso e, conseqüentemente, a pressão oxidativa no PSII. As cultivares BRS 1216 e BRS 3210 possuem maior produtividade fotossintética, mesmo sob estresse hídrico. Nossas descobertas sugerem que as cultivares de cafeeiro Robustas Amazônicos toleram bem o aumento da tensão de água no solo, até 100 kPa, tendo boa capacidade adaptativa ao déficit hídrico moderado da região e, ao passar por um período de estresse hídrico, os cafeeiros conseguem lidar melhor com esta condição no ciclo seguinte.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Embrapa Acre, Embrapa Rondônia, Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal – UFAC e ao Consórcio Pesquisa Café por viabilizar o desenvolvimento do projeto (20/2018 - Programa Café) e os pesquisadores integrantes do projeto.

REFERÊNCIAS

AGRITEMPO. Sistema de monitoramento agrometeorológico. **Dados meteorológicos:** Acre. Disponível em: <https://www.agritempo.gov.br/agritempo/index.jsp>. Acesso em: 4 dez. 2024.

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ARAÚJO, L. F. B. D., ESPINDULA, M. C., ROCHA, R. B., TORRES, J. D., CAMPANHARO, M., OLIVEIRA PEGO, W. F., & ROSA, S. E. D. S. Genetic divergence based on leaf vegetative and anatomical traits of *Coffea canephora* clones. **Semina Ci. agr.**, p. 2717-2734, 2021. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n5p2717>
- BATES, L.S. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Short communication, **Plant and Soil**, v. 39, p. 205-207, 1973.
- BONOMO, D. Z.; BONOMO, R.; PEZZOPANE, J. R. M.; SOUZA, J. M. Alternativas de manejo de água de irrigação em cultivos de conilon. **Coffee Science**, v. 9, p. 537-545, 2014.
- BONOMO, R.; SOUZA, J. M. Uso eficiente da água na irrigação do cafeeiro Conilon. In: PARTELLI, F. L.; BONOMO, R. **Café conilon: o clima e o manejo da planta**. Alegre, ES: CAUFES, 2016. Cap. 6, p. 93-110.
- BOTE AD, JAN V. Branch growth dynamics, photosynthesis, yield and bean size distribution in response to fruit load manipulation in coffee trees. **Trees**, v. 30, n. 4, p. 1275–1285, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1365-x>
- CAIRO, P. A. R. **Curso básico de relações hídricas de plantas**. Vitória da Conquista. UESB, 32p, 1995.
- CATARINO ICA, MONTEIRO GB, FERREIRA MJP, TORRES LMB, DOMINGUES DS, CENTENO DC, LOBO AKM AND SILVA EA. Elevated [CO₂] Mitigates Drought Effects and Increases Leaf 5-O-Caffeoylquinic Acid and Caffeine Concentrations During the Early Growth of *Coffea Arabica* Plants. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, p. 676207, 2021. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.676207>
- CAVALCANTI, F. R.; OLIVEIRA, J. T. A.; MARTINS-MIRANDA, A. S.; VIÉGAS, R. A.; SILVEIRA, J. A. G. Superoxide dismutase, catalase and peroxidase activities do not confer protection against oxidative damage in salt-stressed cowpea leaves. **New Phytologist**, v. 163, p. 563-571, 2004.
- CHESEREK, J. J.; GICHIMU, B. M. Drought and heat tolerance in coffee: a review. **International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science**, v. 2, n. 12, p. 498-501, 2012.
- Companhia Nacional de Abastecimento**. Acompanhamento da safra brasileira de café. Brasília, DF: CONAB, v. 12, n. 1, 2025.
- COVRE, A. M.; OLIVEIRA, M.G.; MARTINS, L.D.; BONOMO, R.; RODRIGUES, W.N.; TOMAZ, M.A.; VIEIRA, H.D.; PAYE, H.S.; PARTELLI, F. L. How is the fruit development of *Coffea canephora* trees modulated by the water supply? An analysis of growth curves for irrigated and rainfed systems. **Semin. Ciênc. Agrár.** v. 43, p. 2359-2374, 2022.

- COVRE, A. M.; PARTELLI, F. L.; GONTIJO, I., & ZUCOLOTO, M. Distribuição do manejo radicular de cafeeiro conilon irrigado e não irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 11, p. 1006-1016, 2015. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015001100003>
- CUSTODIO, A. M.; SILVA, P. E. M.; SANTOS, T. R. D.; LOURENÇO, L. L.; AVILA, R. G.; SILVA, A. R.; LIMA E SILVA, F. H.; ESPINDULA, M. C.; DIAS, J. R. M.; SILVA, F.G. Seasonal variation in physiological traits of amazonian *Coffea canephora* genotypes in cultivation systems with contrasting water availability. **Agronomy**, v. 12, p. 3197, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123197>
- DaMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian journal of plant physiology**, v. 18, n. 1, p. 55-81, 2006.
- DAVIS, A. P.; TOSH, J.; RUCH, N.; FAY, M. F. Growing coffee: *Psilanthus* (*Rubiaceae*) subsumed on the basis of molecular and morphological data: implications for the size, morphology, distribution and evolutionary history of *Coffea*. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 167, n. 1, p. 357-377, 2011.
- DEUNER, S.; ALVES, J. D.; ZANANDREA, I.; GOULART, P. D. F. P.; SILVEIRA, N. M.; HENRIQUE, P. D. C.; MESQUITA, A. C. Stomatal behavior and components of the antioxidative system in coffee plants under water stress. **Scientia Agricola**, v. 68, p. 77-85, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162011000100012>
- DUBOIS, M.; GILLES, K.A.; HAMILTON, J.K.; REBERS, P.A.; SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, v. 28, p. 350-356, 1956.
- ESPINDULA, M. C.; TEIXEIRA, A. L.; ROCHA, R. B.; RAMALHO, A. R.; VIEIRA JÚNIOR, J. R.; ALVES, E. A.; ... & FERNANDES, C. D. F. **Novas cultivares de cafeeiros *Coffea canephora* para a Amazônia Ocidental Brasileira**: Principais características: Comunicado Técnico 413. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2019.
- FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A.; FERÃO, M. A. G.; MUNER, L. H. (Ed.). **Café Conilon**. 2ª edição, atual. e ampl. Vitória, ES: Incaper, 2017. 784 p.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p.109-112, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>
- GENUCHTEN, M. T. Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society American Journal, Madison**, v. 44, n. 3, p. 892-898, 1980.
- GUIDI, L., LO PICCOLO, E., & LANDI, M. Chlorophyll fluorescence, photoinhibition and abiotic stress: does it make any difference the fact to be a C3 or C4 species? **Frontiers in plant science**, v. 10, p. 174, 2019.
- ICO - International Coffee Organization. **What's New**. Disponível em: <http://www.ico.org/>. Acesso em: 23 out. 2025.

- LICHTENTHALER, H. K.; WELLBURN, A. R. Determination of total carotenoids and chlorophyll a and b of leaf extracts in different solvents. **Biochemical Society Transactions**, p. 591-603, 1983.
- MACHADO FILHO, J. A., RODRIGUES, W. P., BARONI, D. F., PIREDAS, S., CAMPBELL, G., DE SOUZA, G. A. R., ... CAMPOSTRINI, E. Linking root and stem hydraulic traits to leaf physiological parameters in *Coffea canephora* clones with contrasting drought tolerance. **Journal of plant physiology**, v. 258, p. 153355, 2021.
- MARÇAL, D. M., AVILA, R. T., QUIROGA-ROJAS, L. F., DE SOUZA, R. P., JUNIOR, C. C. G., PONTE, L. R., ... & DAMATTA, F. M. (2021). Elevated [CO₂] benefits coffee growth and photosynthetic performance regardless of light availability. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 158, p. 524-535, 2021.
- MARTINS, S. C. V., SANGLARD, M. L., MORAIS, L. E., MENEZES-SILVA, P. E., MAURI, R., AVILA, R. T., et al. How do coffee trees deal with severe natural droughts? An analysis of hydraulic, diffusive and biochemical components at the leaf level. **Trees Struct. Funct.** v. 33, p. 1679–1693, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01889-4>
- MAX, A. C.; LORAM-LOURENÇO, L.; SILVA, F. G.; SOUZA, L. H. M.; DIAS, J. R. M.; ESPÍNDULA, M. C.; ... & MENEZES-SILVA, P. E. A bitter future for coffee production? Physiological traits associated with yield reveal high vulnerability to hydraulic failure in *Coffea canephora*. **Plant, Cell & Environment**, v. 46, n. 3, p. 764-779, 2023. <https://doi.org/10.1111/pce.14514>
- MELO, B. P.; LOURENÇO-TESSUTTI, I. T.; PAIXÃO, J. F. R.; NORIEGA, D. D.; SILVA, M. C. M.; DE ALMEIDA-ENGLER, J.; ... GROSSI-DE-SA, M. F. Transcriptional modulation of AREB-1 by CRISPRa improves plant physiological performance under severe water deficit. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 1-10, 2020.
- R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021.
- RODRIGUES, W. P.; MACHADO FILHO, J. A.; SILVA, J. R.; ASSIS, F. A. M. M.; FERRAZ, T. M.; FERREIRA, L. S.; ... & CAMPOSTRINI, E. Whole-canopy gas exchanges in *Coffea* sp. is affected by supra-optimal temperature and light distribution within the canopy: The insights from an improved multi-chamber system. **Scientia Horticulturae**, v. 211, p. 194-202, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2016.08.022>
- RODRIGUES, W. P.; SILVA, J. R.; FERREIRA, L. S.; MACHADO FILHO, J. A.; FIGUEIREDO, F. A. M. M. A.; FERRAZ, T. M.; CAMPOSTRINI, E. Stomatal and photochemical limitations of photosynthesis in coffee (*Coffea* spp.) plants subjected to elevated temperatures. **Crop and Pasture Science**, v. 69, n. 3, p. 317-325, 2018. <http://dx.doi.org/10.1071/cp17044>
- RONCHI, C. P.; DaMATTA, F. M. Aspectos Fisiológicos do Café Conilon. In: FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A.; FERÃO, M. A. G.; MUNER, L. H. (Ed.). **Café conilon**. 2a ed, atual. e ampl. Vitória, ES: Incaper, 2017. 784 p. Cap. 5, p. 103-129.

- SANCHES, R. F. E., CATARINO, I. C. A., BRAGA, M. R., & SILVA, E. A. D. Influência da alta concentração atmosférica de CO₂ ($\uparrow[\text{CO}_2]_{\text{atm}}$) \times disponibilidade hídrica nas relações hídricas, trocas gasosas e acúmulo de carboidratos em *Coffea arabica* L. **Hoehtea**, v. 44, p. 635-643, 2017.
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018
- SCHNEIDER, J. R.; CAVERZAN, A.; CHAVARRIA, G. Water deficit stress, ROS involvement, and plant performance. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 65, n. 8, p. 1160-1181, 2019.
- SCHREIBER, U.; BILGER, W. & NEUBAUER, C. Chlorophyll fluorescence as a non-destructive indicator of rapid assess assessment of in vitro photosynthesis, p. 49–70. In: E.D. Schulze and M.M. Caldwell (eds.). **Ecophysiology of photosynthesis**. Ecological Studies 100. Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- SEMEDO, J. N., RODRIGUES, A. P., LIDON, F. C., PAIS, I. P., MARQUES, I., GOUVEIA, D., et al. Intrinsic non-stomatal resilience to drought of the photosynthetic apparatus in *Coffea* spp. is strengthened by elevated air [CO₂]. **Tree Physiol.** v. 41, p. 708–727, 2021. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpaa158>
- SILVA, M. J. G.; SARAIVA, F. A. M.; SILVA, A. A. G.; SANTOS NETO, L. A.; QUERINO, C. A. S. Clima. In: MARCOLAN, A. L.; ESPINDULA, M. C. **Café na Amazônia**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Cap. 2, p. 41-55.
- SOLIMÕES, F. C. R.; ESPINDULA, M. C.; TEIXEIRA FILHO, A. D. J.; SOUSA, A. L. B.; FERREIRA, F. M. Seasonal vegetative growth of *Coffea canephora* associated with two water management in the South-Western Amazon. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 44, n. 4, p. 1265-1286, 2023. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2023v44n4p1265>
- SOUROUR, A.; AFEF, O.; MOUNIR, R.; MONGI, B. Y. A review: morphological, physiological, biochemical and molecular plant responses to water deficit stress. **The International Journal of Engineering And Science**, v. 6, n. 1, p. 1-4, 2017.
- SOUZA, B. P., MARTINEZ, H. E. P., DE CARVALHO, F. P., LOUREIRO, M. E., & STURIÃO, W. P. Gas exchanges and chlorophyll fluorescence of young coffee plants submitted to water and nitrogen stresses. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n. 16, p. 2455-2465, 2020.
- TEIXEIRA, A. L.; ROCHA, R. B.; ESPINDULA, M. C.; RAMALHO, A. R.; VIEIRA JÚNIOR, J. R.; ALVES, E. A.; LUNZ, A. M. P.; SOUZA, F. F.; COSTA, J. N. M.; FERNANDES, C. F. Amazonian Robustas-new *Coffea canephora* coffee cultivars for the Western Brazilian Amazon. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, n. 20, n. 3, 2020. <https://doi.org/10.1590/1984-70332020v20n3c53>
- TETENS, O. Über einige meteorologische Begriffe. **Zeitschrift für Geophysik**, v. 6, n. 1, p. 297-309, 1930.

- THIOUNE, E.; MCCARTHY, J.; GALLAGHER, T.; OSBORNE, B. A humidity shock leads to rapid, temperature dependent changes in coffee leaf physiology and gene expression. **Tree Physiology**, v. 37, 2017.
- TOUNEKTI, T.; MAHDHI, M.; AL-TURKI, T. A.; KHEMIRA, H. Water relations and photo-protection mechanisms during drought stress in four coffee (*Coffea arabica*) cultivars from southwestern Saudi Arabia. **South African journal of botany**, v. 117, p. 17-25, 2018.
- YEMM, E.W.; COCKING, E.F. The determination of amino acids with ninhydrin. **Analyst**, v. 80, p. 209-213, 1955.

MATERIAL SUPLEMENTAR

Tabela S1. Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis de fotossíntese e fluorescência de clones de *Coffea canephora* cultivados sob diferentes tensões de água no solo.

Fonte de Variação	GL	QM											
		2021											
		A	gS	E	Ci	EUA	EC	Fv/Fm	$\phi PSII$	qP	NPQ	ETR	ExC
Bloco	2	7,61	0,000	2,60	37,81*	0,69	0,01	0,001	0,000	0,002	1,00	188,86	85,28
Tensões (A)	4	120,75**	0,020**	23,45**	114,93	1,42	0,199**	0,014**	0,032**	0,084**	0,81	7998,99**	814,09**
Erro 1	8	2,38	0,000	0,52	28,80	1,99	0,007	0,000	0,000	0,003	1,43	81,08	42,62
Clone (B)	5	8,75**	0,001**	2,37**	22,77*	0,10	0,010*	0,003**	0,000	0,008*	0,65	200,08	42,74
A x B	20	2,02	0,000	0,52	6,16	0,17	0,003	0,001	0,000	0,003	0,52	120,46	49,43
Erro 2	50	2,21	0,000	0,53	6,74	0,18	0,003	0,000	0,000	0,002	0,47	125,55	29,94
CV % (a)		28,77	57,73	27,67	20,61	70,41	39,28	3,38	18,46	29,23	87,44	16,77	47,85
CV % (b)		27,72	40,76	27,82	9,97	21,20	27,48	3,87	21,61	27,61	50,20	20,86	40,11
2022													
Bloco	2	25,34	0,000	1,13	270,52	14,75	0,263	0,001	0,000	0,003	0,22	171,67	118,71
Tensões (A)	4	35,47*	0,001*	1,94*	73,85	6,20	0,196	0,001*	0,001*	0,004*	0,46	382,83*	215,15*
Erro (A)	8	8,16	0,000	0,49	69,93	4,12	0,100	0,000	0,000	0,001	0,27	67,92	39,97
Clone (B)	5	2,35	0,000**	1,11*	37,60*	0,91	0,015	0,005**	0,000*	0,002	1,03**	219,95*	5,86
A x B	20	1,93	0,000	0,37	21,17	0,62	0,013	0,000	0,000	0,001	0,37	66,12	5,32
Erro 2	50	1,65	0,000	0,38	11,62	0,97	0,017	0,000	0,000	0,001	0,28	99,00	6,22
CV % (a)		55,44	62,39	39,15	40,63	67,42	109,35	2,61	22,17	26,29	43,98	22,10	73,32
CV % (b)		24,95	43,92	34,32	16,56	32,88	45,25	3,73	26,70	28,98	45,39	26,68	28,93

* e ** indica significância à $p < 0,05$ e $< 0,01$, respectivamente, pelo teste t de Fisher (LSD). A, fotossíntese; gS, condutância estomática; E, transpiração; Ci, Concentração interna de CO₂; EUA, eficiência do uso da água; EC, eficiência de carboxilação; Fv/Fm, Eficiência quântica máxima do PSII; $\phi PSII$, eficiência quântica operacional do PSII; qP, quënting fotoquímico; NPQ, quënting não fotoquímico; ETR, taxa de transporte de elétrons; ExC, excesso de energia.

Tabela S2. Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis fisiológicas e bioquímicas de clones de *Coffea canephora* cultivados sob diferentes tensões de água no solo.

Fonte de Variação	GL	QM										
		2021										
		<i>Chl a</i>	<i>Chl b</i>	<i>Chl total</i>	<i>Chl a/b</i>	<i>Car</i>	<i>DM</i>	<i>CRA</i>	<i>CST</i>	<i>Amido</i>	<i>AST</i>	<i>Pro</i>
Bloco	2	2,22	0,39	3,08	0,23	0,005	40,43	78,69	141900,31	6188,32	377301,05	3542,97
Tensões (A)	4	21,89**	16,08*	91,46**	0,34*	0,049*	654,47*	15,56	920920,72*	20606,23	109547,74*	42857,27**
Erro 1	8	2,77	2,42	11,94	0,08	0,008	124,51	33,98	112364,11	7215,62	36176,97	5430,07
Clone (B)	5	2,02	2,84*	8,66	0,30*	0,008	164,66*	31,20	21199,11	2955,40	40246,15	13539,11**
A x B	20	0,63	0,73	1,85	0,10	0,004	83,09	37,04	49891,65	6235,00	25233,51	3945,74
Erro 2	50	1,48	1,11	4,69	0,12	0,005	75,27	43,92	31384,98	2434,29	35571,72	3067,80
CV % (a)		34,64	54,33	45,17	16,22	30,75	39,89	7,42	41,73	32,03	41,29	30,40
CV % (b)		25,28	36,76	28,32	19,40	24,28	31,02	8,44	22,06	18,60	40,94	22,85
2022												
Bloco	2	0,01	0,34	0,52	0,03	0,000	74,05	53,00	35882,61	134309,62*	4949,65	573,86
Tensões (A)	4	0,60	0,37	1,87	0,05	0,005	12,78	67,63	49542,06*	54772,36**	67235,46	490,08
Erro 1	8	0,78	0,29	1,44	0,14	0,002	9,20	139,86	10172,79	5342,21	35933,77	590,86
Clone (B)	5	2,01**	1,24**	6,35	0,04	0,006**	22,56*	70,64	20359,03*	56324,48**	46478,49	1687,77**
A x B	20	0,47	0,15	0,87	0,15	0,002	11,58	47,37	9399,02	18114,05	35940,64	534,67
Erro 2	50	0,40	0,11	0,74	0,96	0,001	10,37	43,59	6882,83	9263,51	37499,29	315,71
CV % (a)		31,01	25,94	26,11	23,36	15,15	17,99	15,95	10,32	20,81	22,87	23,40
CV % (b)		22,23	19,09	18,74	18,85	12,17	19,10	8,91	8,49	27,41	23,36	17,11

* e ** indica significância à $p < 0,05$ e $< 0,01$, respectivamente, pelo teste t de Fisher (LSD). *Chl a*, Clorofila-a; *Chl b*, Clorofila-b; *Chl total*, clorofila total; *Chl a/b*, relação clorofila a/b; *Car*, carotenoides; *DM*, dano de membrana; *CRA*, conteúdo relativo de água; *CST*, carboidratos solúveis totais; *AST*, aminoácido solúveis totais; *Pro*, prolina.

CAPÍTULO III

CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS, BIOQUÍMICAS E DE CRESCIMENTO DE CAFEEIROS CANÉFORA SOB DIFERENTES NÍVEIS DE ÁGUA NO SOLO

CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS, BIOQUÍMICAS E DE CRESCIMENTO DE CAFEEIROS ROBUSTAS AMAZÔNICOS SOB DIFERENTES NÍVEIS DE ÁGUA NO SOLO

Núbia Pinto Bravin, Marcio de Oliveira Martins

Resumo

As variações de água no solo tornam os cafeeiros suscetíveis a condições de estresse por déficit hídrico. Este estudo teve como objetivo avaliar as características fisiológicas e bioquímicas de cultivares de *Coffea canephora* submetidas a diferentes níveis de água no solo em condições controladas. Os tratamentos envolveram três cultivares de cafeeiro canéfora, BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210, e quatro níveis de água no solo, 80%, 40%, 20% e 10% da capacidade de vaso (CC). O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com esquema fatorial 3 x 4, e 5 repetições. Foram avaliadas as trocas gasosas, a fluorescência da clorofila-a, dano de membranas, conteúdo relativo de água, teores de pigmentos fotossintéticos e metabólitos e alocação de biomassa. A redução do nível de água no solo reduziu progressivamente a *A*, *gS*, *E*, *ΦPSII*, *Fv/Fm*, *CRA*, e a *MS*, entretanto, após 35 dias, os tratamentos de 20% e 10% não diferiram entre si. Não houve variação nos teores de pigmentos fotossintéticos. A concentração de *Pro* e *Chla/Chlb* foram aumentadas sob estresse hídrico severo. A redução da *gS* em mudas de *Coffea canephora* cultivadas a 40% da capacidade de vaso é um mecanismo chave para evitar a perda de água nessas plantas, sendo capazes de manter o *CRA* no tecido foliar e a taxa fotossintética, e evitar o *DM*. As cultivares são semelhantes quanto capacidade de lidar com o estresse hídrico. A cultivar BRS 2314 tem menor acúmulo total de biomassa, porém, maior relação *R/Pa*, podendo ser indicada para o cultivo em condição de déficit hídrico.

Palavras-chave: *Coffea canephora*, estresse hídrico, mecanismos de tolerância, trocas gasosas.

1 Introdução

O cultivo do cafeeiro enfrenta desafios crescentes, como o estresse hídrico agravado pelas mudanças climáticas. Neste cenário, eventos climáticos extremos, especialmente aqueles caracterizados pela combinação de temperaturas elevadas e restrição hídrica, impõem desafios ao desenvolvimento e à sobrevivência da cultura (SANTOS *et al.*, 2021). A deficiência hídrica ocasiona alterações no comportamento vegetal, sendo que a intensidade dos efeitos varia conforme o genótipo, a duração do déficit, a severidade e o estágio de desenvolvimento da planta (RONCHI e DaMATTA, 2017; SOUROUR *et al.*, 2017).

Entre os genótipos de *Coffea canephora* atualmente recomendados e cultivados, alguns demonstram capacidade de sobreviver e produzir de maneira satisfatória, mesmo em condições de estresse hídrico moderado (ROCHA *et al.*, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2018). Na região amazônica,

segunda maior produtora de café canéfora do Brasil, as lavouras são compostas por plantas popularmente denominadas Robustas Amazônicas, cuja as características fenotípicas e produtivas se diferem das demais populações. Esses materiais, resultantes de cruzamentos naturais e dirigidos entre as variedades botânicas “conilon” e “robusta”, apresentam características adaptadas às condições ambientais do oeste da Amazônia brasileira (TEIXEIRA *et al.*, 2020; CUSTÓDIO, 2022; TADEU *et al.*, 2024). A plasticidade fisiológica e os mecanismos bioquímicos de ajuste tornam os Robustas Amazônicas uma alternativa promissora para regiões sujeitas ao déficit hídrico.

Apesar do alto volume pluviométrico na região amazônica, superior a 2000 mm anuais, a distribuição irregular das chuvas com elevada evapotranspiração e um acentuado déficit hídrico compromete a sustentabilidade dos materiais cultivados (CUSTÓDIO, 2022). Nas principais áreas produtoras na região, o período crítico de seca ocorre entre junho e setembro, quando as chuvas mensais ficam abaixo de 50 mm (AGRITEMPO, 2024). O evento coincide com o florescimento e a frutificação do cafeeiro, o que resulta no abortamento floral e a queda de frutos novos (MARCOLAN *et al.*, 2009).

As plantas de café são afetadas pela restrição hídrica desde a fase de florada à frutificação e a magnitude desse processo vai depender da intensidade e duração em que o déficit é imposto e da diversidade genotípica entre suas cultivares quanto à tolerância à seca (SHAO *et al.*, 2008; BONOMO *et al.*, 2016). O cafeeiro possui baixa condutividade hidráulica (BONOMO *et al.*, 2016) e, uma vez que a disponibilidade hídrica no solo diminui, seu potencial hídrico também será reduzido, resultando em um forte fechamento estomático. Como consequência, as taxas fotossintéticas, o crescimento e a produtividade do cafeeiro são significativamente reduzidos (DEUNER *et al.*, 2011; CHESEREK e GICHIMU, 2012; TOUNEKTİ *et al.*, 2018). Os efeitos do déficit hídrico no cafeeiro podem ser agravados pela associação com altas temperaturas, intensa irradiância e elevado déficit de pressão de vapor (BARONI *et al.*, 2024).

Para mitigar os danos do déficit hídrico, os cafeeiros ativam mecanismos adaptativos importantes para lidarem com o estresse. Além do eficiente controle estomático, os cafeeiros apresentam baixa elasticidade da parede celular, permitindo que o turgor celular diminua mais lentamente à medida que a desidratação progride (DaMATTA e RAMALHO, 2006). O acúmulo de osmólitos compatíveis ajudam a preservar o estado hídrico e a reduzir os impactos do estresse osmótico (SCHNEIDER *et al.*, 2019). Tounekti *et al.* (2018) constataram o acúmulo de altos níveis de prolina em folhas de cafeeiros submetidos ao déficit hídrico. Características bioquímicas seriam também importantes, como a existência de um sistema antioxidativo mais robusto e manutenção da capacidade de exportação, relacionados à desintoxicação de radicais pela produção de compostos, como aminoácidos (TOUNEKTİ *et al.*, 2018) e ação sincronizada de enzimas antioxidantes (DEUNER *et al.*, 2011).

As inúmeras deficiências no conhecimento sobre a fisiologia do café canéfora têm produzido um campo fértil de desafios a serem vencidos em pesquisas futuras. Os esforços em investigações científicas são essenciais para aumentar a base de conhecimento sobre as interações fisiológicas do café canéfora

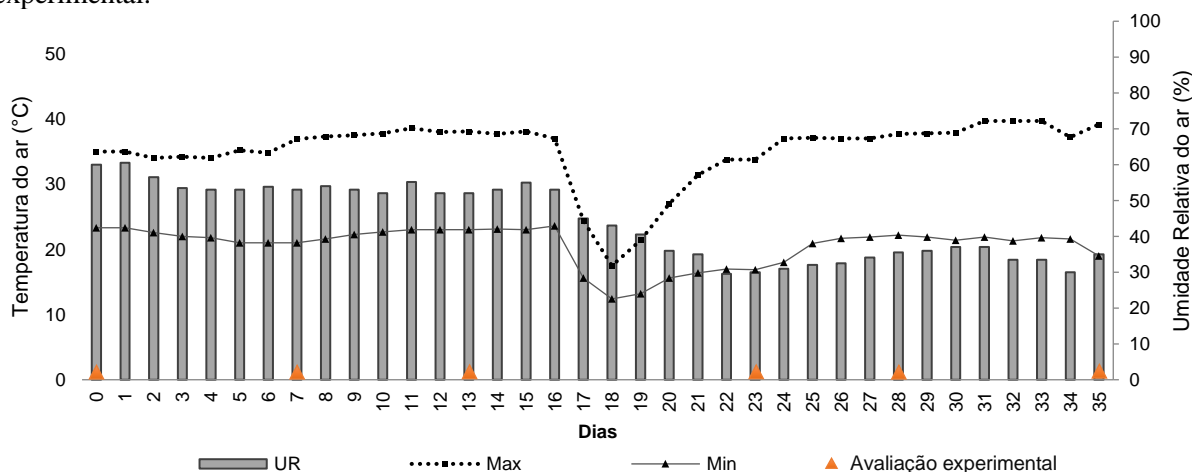
com o seu ambiente. Sobretudo, o entendimento sobre os mecanismos fisiológicos e bioquímicos podem fornecer informações de modo a subsidiar a racionalização do manejo da lavoura cafeeira na Amazônia (RONCHI e DaMATTA, 2017). Neste contexto, buscando identificar genótipos mais tolerantes e compreender os mecanismos fisiológicos envolvidos na resposta ao estresse hídrico, o presente estudo teve como objetivo avaliar as características fisiológicas, bioquímicas e de crescimento de cultivares de *Coffea canephora* submetidas a diferentes níveis de água no solo em condições controladas.

2 Material e Métodos

2.1 Condições de cultivo e material vegetal

O experimento foi conduzido em ambiente protegido, na Universidade Federal do Acre - UFAC, em Rio Branco, Acre. A área está localizada à latitude de 9° 57'35'' S, longitude de 67°52'08'' O e altitude de 150 m. A temperatura média anual é de 25,35 °C, com umidade relativa de 86% e pluviosidade média de 1.800 mm por ano (INMET, 2024). As médias de temperatura, umidade relativa do ar (URar) e déficit de pressão de vapor (DPV) durante o período do experimento, foram monitoradas com indicador de temperatura e UR, fixado na área experimental (Figura 1). O DPV foi obtido pela diferença entre a pressão de saturação de vapor d'água (e_s) e a pressão parcial de vapor (e_a), conforme a metodologia de Tetens (1930).

Figura 1. Umidade relativa do ar (URar) e temperatura do ar máxima e mínima durante o período experimental.



Foram utilizadas mudas de café canéfora (*Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner) com 4 meses, obtidas da Embrapa Acre. As três cultivares foram selecionadas a partir de um primeiro estudo (Capítulo II), tendo como base suas características fisiológicas de maior (BRS 1216 e BRS 3210) e menor (BRS 2314) produtividade fotossintética observada, a fim de ter materiais com características distintas. Os genótipos foram oriundos de hibridação natural e controlada entre plantas matrizes das variedades conilon (GS1) e robusta (GS2) desenvolvidos pela Embrapa para cultivo na Amazônia

Ocidental Brasileira, com seleção para as características agronômicas como produtividade, resistência a estresses bióticos, compatibilidade entre cultivares e qualidade de bebida (TEIXEIRA *et al.*, 2020). As plantas foram propagadas vegetativamente a partir de estacas (segmentos de ramos ortotrópicos) de cinco centímetros. Para a produção das mudas foi utilizado substrato composto por 70 a 80% de solo de subsuperfície e 20 a 30% de fertilizante orgânico (ESPINDULA *et al.*, 2015), acondicionados em sacos de polietileno de 0,83 cm³. Após o estaqueamento, as mudas foram mantidas em viveiro com irrigação por nebulização com umidade relativa de 90-100%, durante 120 dias. Após este período, foram transportadas para casa de vegetação e transplantadas para vasos de 8 l contendo substrato comercial e areia (1:1).

2.2 Tratamentos e delineamento experimental

Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 x 4, com 5 repetições. Os tratamentos corresponderam a três cultivares de cafeeiro canéfora (BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210) e, quatro níveis de água no solo: plantas bem irrigadas, com umidade do solo à 80% da capacidade de campo (CC), irrigação intermediária, com umidade do solo à 40% da CC, déficit hídrico moderado, mantendo a umidade do solo à 20% da CC e, déficit hídrico severo, à 10% da CC.

2.3 Manejo da Irrigação

As plantas foram submetidas aos tratamentos de déficit hídrico aos 40 dias após o transplântio. Para a determinação da capacidade de campo, foi utilizado o método de saturação. Em três vasos foram adicionados a mesma quantidade do substrato previamente seco (areia + substrato comercial 1:1) e a massa total foi aferida (P1). Em cada vaso foi adicionado água lentamente até o início da drenagem e uma nova leitura da massa foi obtida (P2). Os vasos foram mantidos com superfície protegida a fim de evitar a perda de água por transpiração e foram submetidos à pesagem diária até obtenção de massa constante (P3). A diferença entre P3 e P1 foi determinada como a capacidade de campo do substrato (100% CC), assumindo a média entre os três vasos.

A irrigação foi realizada diariamente. Para a imposição dos tratamentos hídricos, foi realizada a pesagem diária dos vasos e feita a irrigação individual de cada parcela até atingir o nível de água no solo pré-estabelecidos como tratamentos, 80%, 40%, 20% e 10% da CC. Inicialmente, a CC foi elevada à 80% em todas as unidades experimentais. Em seguida, o estresse foi imposto pela retirada completa da irrigação nos tratamentos de 40%, 20% e 10%, até que a CC atingisse os valores determinados, o que ocorreu, respectivamente, aos 8, 20 e 31 dias após o início do experimento.

2.4 Amostragem e Avaliações

Análises de trocas gasosas e fluorescência da clorofila-a foram realizadas aos 0, 7, 13, 23, 28 e 35 dias de experimento. As demais, que envolviam coleta de material vegetal, foram realizadas ao final do experimento, aos 35 dias após a imposição dos tratamentos.

2.4.1 Trocas gasosas

Em uma planta de cada parcela foram avaliadas as trocas gasosas através de um sistema portátil de determinações de trocas de gases de fluxo aberto (IRGA Modelo LI-6400XT, LI-COR, Lincoln, NE, USA). Utilizou-se densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD) de $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, concentração de CO_2 referência de $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$, temperatura do bloco na câmara foliar fixada em 30°C , e condições ambiente de déficit de pressão de vapor (DPV).

Foram determinados a taxa de assimilação de CO_2 (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$); taxa de transpiração foliar (E) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$); condutância estomática ao vapor de água (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$); e pressão parcial de CO_2 (C_i) (Pa). A partir da relação A/E ($\mu\text{mol de CO}_2/\text{mmol de H}_2\text{O}$) foi calculada a eficiência de uso da água (EUA) e, da relação A/C_i , ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}/\text{Pa}$) a eficiência de carboxilação instantânea (EC). As avaliações ocorreram no período da manhã, entre 8:00 e 12:00 h, em folhas completamente expandidas e em perfeito estado fitossanitário, localizadas no terço médio da planta.

2.4.2 Fluorescência da Clorofila-a

Os dados de fluorescência da clorofila-a foram obtidos com uma fluorômetro acoplado ao IRGA (LI-6400XT, Licor, USA). As medições foram efetuadas juntamente com as análises de trocas gasosas. As folhas foram previamente adaptadas ao escuro durante 30 min, com o auxílio de envelopes de papel alumínio. Inicialmente foi mensurada a fluorescência inicial de folhas adaptadas ao escuro (F_o) e, após iluminação com feixes de medição de modulação fraca em vermelho-distante ($0,03 \mu\text{mol fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$), foi mensurada a fluorescência mínima (F_o'). Para obter a fluorescência máxima (F_m), as folhas foram expostas a pulso de luz branca saturada com densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD) de $8000 \mu\text{mol fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 0,7 s, conforme a metodologia de Schreiber et al. (1994). Um pulso de luz branca saturante ($8000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 0,7 s) foi posteriormente aplicado para atingir a fluorescência máxima aclimatada à luz (F_m'). Luz azul foi mantida em 10% da radiação aplicada para maximizar a abertura estomática.

Usando os valores desses parâmetros foram então determinados: a eficiência quântica máxima do fotossistema II (PSII) [$F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$]; eficiência quântica operacional do PSII [$\Phi_{PSII} = (F_m' - F_s)/F_m'$]; coeficiente de extinção fotoquímica [$qP = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_o')$]; coeficiente de extinção não-fotoquímica [$NPQ = (F_m - F_m')/F_m'$]; e taxa aparente de transporte de elétrons para o PSII [$ETR = ((F_m' - F_s)/F_m') \times f \times I \times \alpha_{folha}$], sendo f a fração de quanta absorvido que é distribuída para o PSII, tipicamente assumido ser a constante 0,5; I a densidade de fluxo de fótons incidente ($1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); e α_{folha} a constante para a fração de luz absorvida pelas folhas, dado como 0,85. Adicionalmente, a partir da relação ETR/A ($\mu\text{mol e}^- \mu\text{mol CO}_2$) foi calculado o excesso de energia (ExC).

2.4.3 Pigmentos Fotossintéticos

Os teores de clorofilas-a (Chl_a), b (Chl_b), clorofila total (Chl_{total}) e carotenoides (Car) foram determinados pelo método de extração usando acetona 80%, conforme metodologia de Lichtenthaler e

Welburn (1983). Pequenos fragmentos foliares de $\cong 0,05\text{g}$ foram inseridos em tubos de ensaio contendo 5 mL de acetona a 80%, protegidos da luz. Estes foram mantidos por 72 horas, a 25°C. A leitura da absorbância com espectrofotômetro foi efetuada nos comprimentos de onda de 663 nm e 647 nm para determinação das clorofilas *a* e *b*, respectivamente, e 470 nm para os carotenoides. Os teores (mg/g de massa fresca) foram determinados calculando: $Chl_{total} = (17,3 \times A_{647} + 7,18 \times A_{663})$; $Chl_a = (12,21 \times A_{663} - 2,81 \times A_{647})$; $Chl_b = (20,13 \times A_{647} + 5,03 \times A_{663})$; e $Car = ((1000 \times A_{470}) - (3,27 \times [Chl_a]) - (104 \times [Chl_b])) / 229$.

2.4.4 Conteúdo Relativo de Água e Dano de Membrana

O conteúdo relativo de água (CRA) foi determinado através da metodologia proposta por Cairo (1995). Discos foliares ($\cong 100\text{ mg}$), obtidos das mesmas folhas utilizadas nas análises anteriores, foram pesados em balança analítica para determinação da massa fresca (MF). Em seguida, foram colocados em placas de Petri contendo 10 mL de água destilada e mantidos à temperatura de 4°C, durante 48h. Após este período, foram retirados, secos com papel toalha e submetidos a uma nova pesagem, para obtenção da massa túrgida (MT). Para obter a massa seca (MS), os discos foliares foram submetidos à secagem em estufa de circulação de ar forçado a 65°C até atingirem massa constante. O CRA foi determinado pela equação: $CRA = [(MF-MS)/(MT-MS)] \times 100$.

O grau de dano de membrana (DM), que indica a ocorrência de estresse oxidativo, foi estimado a partir do extravasamento de eletrólitos. Amostras de tecido foliar ($\cong 1\text{ cm}^2$), provenientes das mesmas folhas utilizadas nas análises anteriores, foram inseridas em tubos de ensaio contendo 10 mL de água destilada à 25°C, durante 48 h. Por meio de condutivímetro de bancada foi verificada a condutividade elétrica da suspensão (C1). As amostras foram colocadas em banho-maria a 100°C por 1 h e, após resfriarem, foi efetuada a segunda leitura (C2). O DM foi determinado pela metodologia proposta por Cavalcanti *et al.* (2004), onde, $DM (\%) = (C_1/C_2) \times 100$.

2.4.5 Metabólitos

Para obtenção do extrato aquoso utilizou-se fragmentos de material foliar seco, obtidos das mesmas folhas utilizadas nas análises anteriores. Após macerado, realizou-se a extração por aquecimento em banho-maria a 100°C por 1 h. Armazenou-se o extrato final sob refrigeração, a 4°C.

Os teores de aminoácidos solúveis totais (AST) foram determinados segundo Yemm e Cocking (1955). Em 650 μL do tampão citrato (0,2 M, pH 5,0; NaOH 1,0 M) e 100 μL do extrato aquoso foi adicionado 600 μL do reagente revelador (ninhidrina 5% + KCN 0,2 mM). Após agitação, foram mantidos em banho-maria por 15 minutos, a 100°C, seguido por resfriamento. Foi adicionado 650 μL de etanol 60% e a leitura realizada em espectrofotômetro à 570 nm.

Para determinação dos teores de prolina livre (*Pro*) foi preparada uma solução contendo 1 mL do extrato aquoso bruto, 1 mL de ninhidrina ácida e 1 mL de ácido acético glacial. Esta foi levada a banho-maria por 1 h a 100°C, seguido por resfriamento. Após agitação, a fase menos densa foi aspirada e feita leitura em espectrofotômetro à 520 nm, conforme Bates (1973).

Os teores de carboidratos solúveis totais (*CST*) foram obtidos pelo método de Dubois et al. (1956). Para determinação dos *CST*, foram adicionados 500 µL de solução fenol 5% e 2,5 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) em 500 µL de extrato aquoso bruto. Após agitação, foram mantidos em repouso por 10 min para a leitura em espectrofotômetro à 490 nm.

As concentrações dos carboidratos, prolina e aminoácidos livres foram calculadas tendo como referência a equação obtida para a curva padrão, expressa em µmol g⁻¹ de MF.

2.4.6 Matéria Seca e alocação de biomassa

Para as análises de crescimento foram coletados, separadamente, as folhas, caules e raízes e acondicionados em saco de papel. O material foi levado à estufa de circulação de ar forçado a 65°C e mantido até atingirem massa constante. Após a pesagem em balança analítica, foram obtidos a massa seca do caule (MS_{caule}), massa seca da folha (MS_{folha}), massa seca da raiz (MS_{raiz}), massa seca total (MS_{total}) e, com base nestes, a relação raiz/parte aérea (R/Pa). A partir da relação MS_{caule}/MS_{total} , MS_{folha}/MS_{total} e MS_{raiz}/MS_{total} , foi determinado a alocação de biomassa no caule (AB_{caule}), na folha (AB_{folha}) e na raiz (AB_{raiz}), respectivamente.

2.6 Análises Estatísticas

Os dados foram verificados quanto à normalidade dos erros e homogeneidade das variâncias populacionais (SHAPIRO e WILK, 1965). Após a análise de variância (ANOVA), as médias significativas foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). A correlação entre as variáveis analisadas e a variação do conjunto dados foram verificadas utilizando técnicas de estatística multivariada por meio da análise de componentes principais.

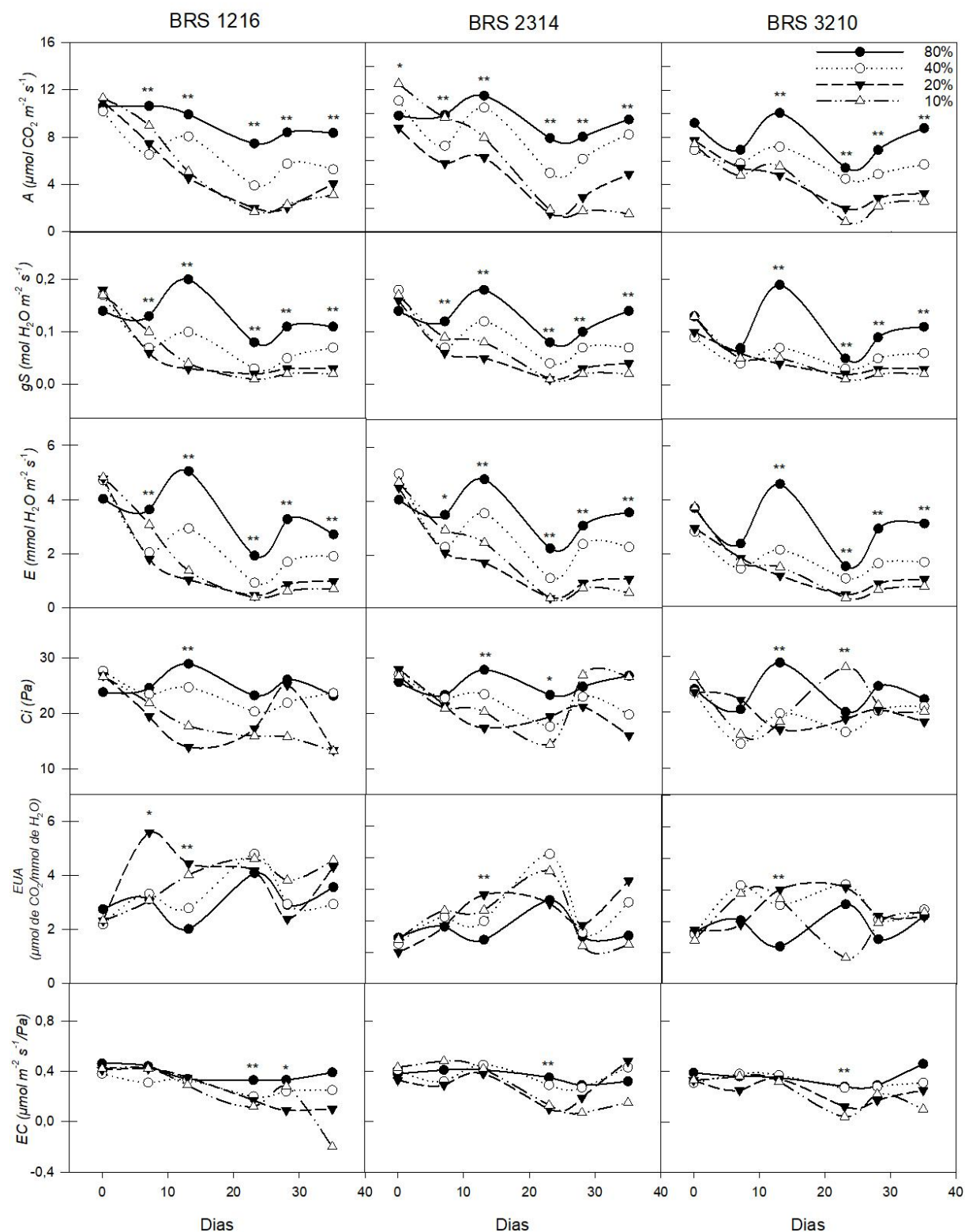
3 Resultados

Não houve interação significativa entre as cultivares e os níveis de água no solo para as variáveis analisadas (Tabelas S1, S2 e S3). Portanto, as médias de cada tratamento foram comparadas de forma isolada.

3.1 Trocas gasosas

Houve redução nos valores de A , gS e E com a diminuição da capacidade de vaso (Figura 2), entretanto, no 35º dia, os tratamentos de 20% e 10% não diferiram entre si. A taxa fotossintética da cultivar BRS 3210 se manteve nos tratamentos de 80% e 40%, aos 35 dias de avaliação e, na BRS 1216, apenas o tratamento de 80% se diferiu dos demais. Em geral, as trocas gasosas diminuíram após o 13º dia com a retomada das altas temperaturas e redução da URar (Figura 1), especialmente para a gS , o que refletiu para as demais variáveis. O aumento da gS sem aumento expressivo da A no dia 13 resultou em uma Ci significativamente maior. Não houve diferença entre as cultivares para as trocas gasosas. Até o 13º dia de avaliação, a cultivar BRS 3210 apresentou menor A , gS e E e, após este período, foram iguais quanto às trocas gasosas (Tabela 1).

Figura 2. Taxa fotossintética (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E), concentração interna de CO_2 (C_i), eficiência do uso da água (EUA) e eficiência de carboxilação (EC) em cultivares de *Coffea canephora*, BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210, cultivadas à 80%, 40%, 20% e 10% da capacidade de vaso.



* e ** indicam diferença significativa pelo teste de Tukey dentro de cada período de avaliação, ao nível de 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Tabela 1. Taxa fotossintética (*A*), condutância estomática (*gS*), transpiração (*E*), concentração interna de CO₂ (*Ci*), eficiência do uso da água (*EUA*) e eficiência de carboxilação (*EC*) em cultivares de *Coffea canephora* BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210.

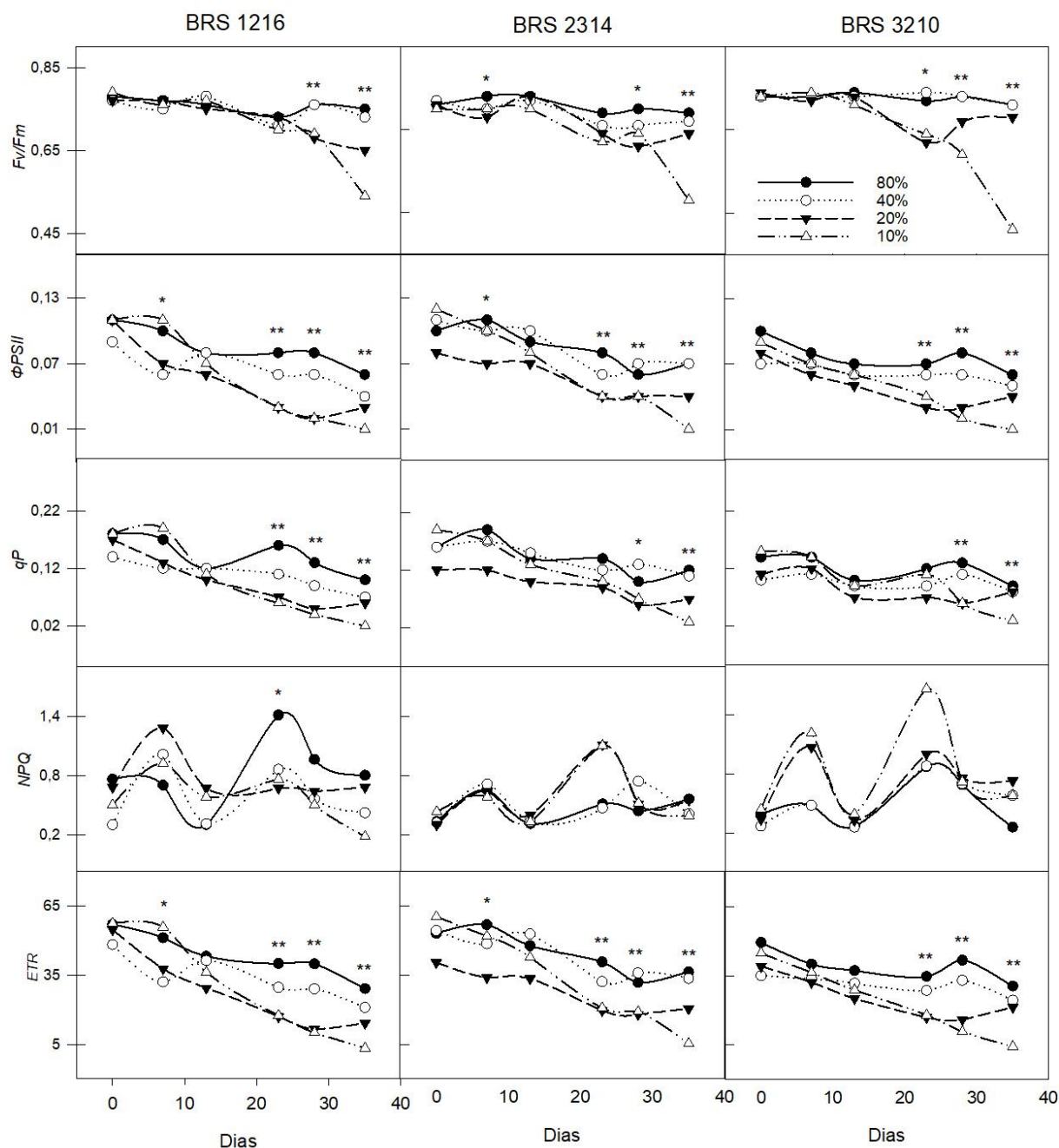
Cultivares	Dias					
	0	7	13	23	28	35
<i>A</i> ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)						
BRS 1216	10,77 a	8,39 a	6,90 b	3,77 ab	4,62	5,20
BRS 2314	10,55 a	8,14 a	9,07 a	4,07 a	4,71	6,02
BRS 3210	7,82 b	5,74 b	6,90 b	3,19 b	4,22	5,08
<i>gS</i> ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)						
BRS 1216	0,16 a	0,09 a	0,09	0,03	0,05	0,06
BRS 2314	0,16 a	0,08 a	0,11	0,04	0,05	0,06
BRS 3210	0,11 b	0,05 b	0,09	0,03	0,05	0,06
<i>E</i> ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)						
BRS 1216	4,58	2,63 a	2,59 ab	0,92	1,61	1,57
BRS 2314	4,56	2,70 a	3,14 a	1,06	1,81	1,90
BRS 3210	3,30	1,84 b	2,36 b	0,87	1,54	1,67
<i>Ci</i> (Pa)						
BRS 1216	26,95	22,92	21,77	19,86	21,71 a	18,75
BRS 2314	25,53	20,30	21,87	18,10	23,76 a	21,27
BRS 3210	25,05	19,53	20,92	20,82	22,44 a	21,11
<i>EUA</i> ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}^{-1}$)						
BRS 1216	2,40	3,78	3,32	4,42	3,02 a	3,85
BRS 2314	2,28	3,02	3,13	4,22	2,54 a	3,15
BRS 3210	2,59	3,48	3,36	3,41	2,90 a	3,24
<i>EC</i> ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$)						
BRS 1216	0,42 a	0,40	0,33	0,20	0,19	0,18
BRS 2314	0,39 ab	0,37	0,41	0,22	0,21	0,35
BRS 3210	0,34 b	0,34	0,35	0,18	0,24	0,28

Médias seguidas de letras iguais dentro de cada período de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

3.2 Fluorescência da Clorofila

O déficit hídrico impactou negativamente a eficiência fotossintética das plantas, conforme evidenciado pela redução nos valores de *Fv/Fm*, *ΦPSII*, *qP* e *ETR*, especialmente a *Fv/Fm* no tratamento de 10% aos 35 dias. Em contrapartida, o *NPQ* não se mostrou um mecanismo das cultivares para dissipação de energia térmica para proteção contra danos foto-oxidativos com a redução da disponibilidade de água (Figura 3). Até o 13º dia de avaliação, a cultivar BRS 3210 apresentou maior *Fv/Fm*, e, aos 35 dias, a cultivar BRS 2314 apresentou maior *ΦPSII*, *qP* e *ETR* (Tabela 2).

Figura 3. Eficiência quântica máxima do PSII (F_v/F_m), eficiência quântica operacional do PSII (Φ_{PSII}), coeficiente de extinção fotoquímica (qP), coeficiente de extinção não-fotoquímica (NPQ) e taxa de transporte de elétrons (ETR) em cultivares de *Coffea canephora*, BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210, cultivadas à 80%, 40%, 20% e 10% da capacidade de vaso.



* e ** indicam diferença significativa pelo teste de Tukey dentro de cada período de avaliação, ao nível de 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

A eficiência quântica operacional do PSII (Φ_{PSII}) apresentou uma redução ao longo do tempo, especialmente a partir do 28º dia. A taxa de transporte de elétrons (ETR) foi inicialmente elevada, mas diminuiu progressivamente, com variações entre os clones, sendo o BRS 1216 o mais eficiente (Tabela 2). O coeficiente de extinção fotoquímica (qP) manteve-se relativamente estável, enquanto o coeficiente de extinção não-fotoquímica (NPQ) apresentou uma tendência de aumento nos primeiros dias, seguido

por uma redução gradual. A eficiência quântica máxima do PSII (F_v/F_m) foi maior nos clones BRS 1216 e BRS 2314.

Tabela 2. Eficiência quântica máxima do PSII (F_v/F_m), eficiência quântica operacional do PSII (Φ_{PSII}), coeficiente de extinção fotoquímica (qP), coeficiente de extinção não-fotoquímica (NPQ) e taxa de transporte de elétrons (ETR) em cultivares de *Coffea canephora*, BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210.

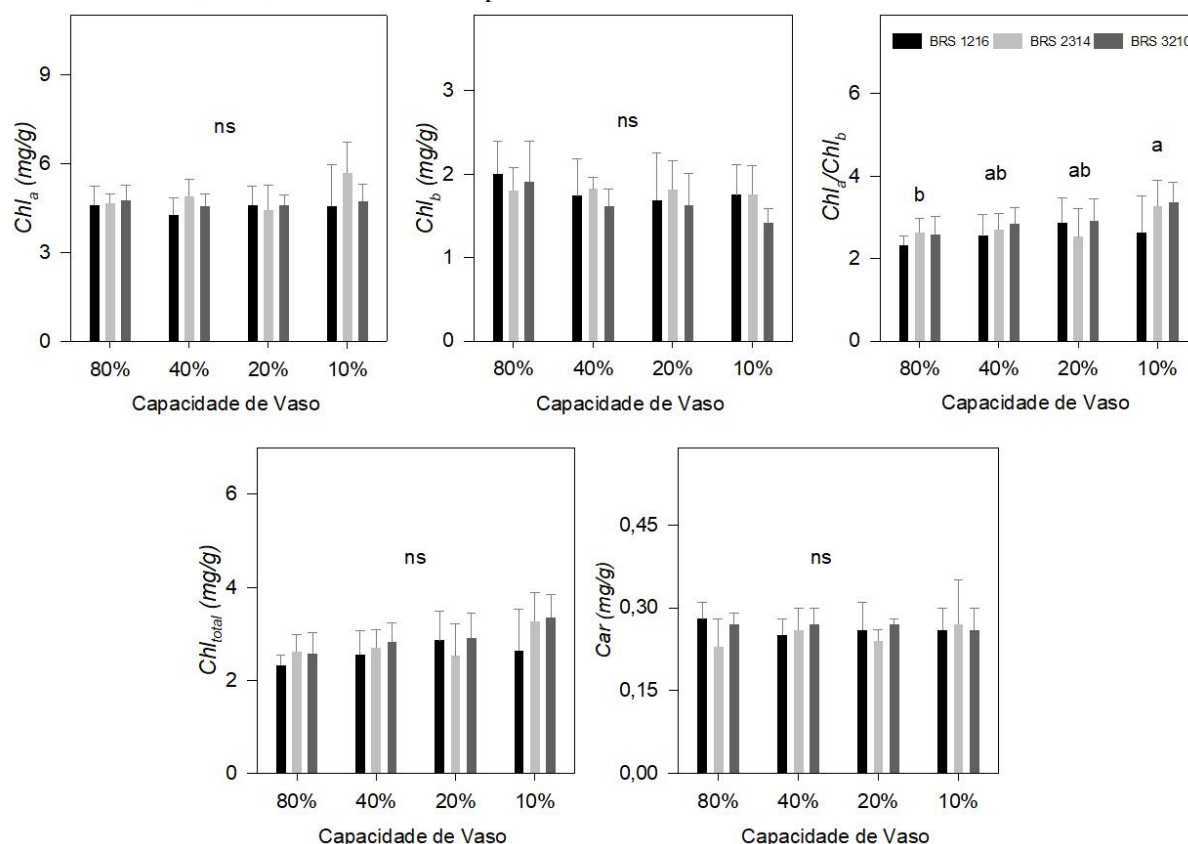
Cultivares	Dias					
	0	7	13	23	28	35
<i>F_v/F_m</i>						
BRS 1216	0,78 ab	0,76 ab	0,77 b	0,71	0,72	0,67
BRS 2314	0,76 b	0,75 b	0,77 b	0,70	0,70	0,67
BRS 3210	0,79 a	0,78 a	0,79 a	0,73	0,73	0,68
<i>Φ_{PSII}</i>						
BRS 1216	0,11 a	0,09 ab	0,07 ab	0,05	0,04	0,03 b
BRS 2314	0,10 a	0,09 a	0,09 a	0,06	0,05	0,05 a
BRS 3210	0,08 b	0,07 b	0,06 b	0,05	0,05	0,04 ab
<i>qP</i>						
BRS 1216	0,17 a	0,15	0,12 ab	0,10	0,08	0,06 b
BRS 2314	0,16 ab	0,16	0,13 a	0,11	0,09	0,08 a
BRS 3210	0,13 b	0,13	0,09 b	0,10	0,09	0,07 ab
<i>NPQ</i>						
BRS 1216	0,56 a	0,97	0,48	1,03	0,66	0,52
BRS 2314	0,34 b	0,57	0,33	0,77	0,56	0,48
BRS 3210	0,36 ab	0,76	0,33	1,16	0,72	0,54
<i>ETR</i>						
BRS 1216	54,34 a	44,19 ab	37,5 ab	26,0	22,60	16,85 b
BRS 2314	52,02 a	47,8 a	44,14 a	28,28	26,17	23,89 a
BRS 3210	42,09 b	35,52 b	30,74 b	24,56	25,38	20,12 ab

Médias seguidas de letras iguais dentro de cada período de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

3.3 Pigmentos Fotossintéticos

Os teores de Chl_a , Chl_b , Chl_{total} e Car não apresentaram diferenças, indicando estabilidade nos níveis de pigmentos fotossintéticos, em ambas cultivares (Tabela 3), mesmo sob condições de restrição hídrica (Figura 4). Por outro lado, a relação $Chl\ a/b$ foi maior em 10% da capacidade de campo, que pode indicar uma adaptação fotossintética para otimização do uso de luz em condições de estresse hídrico.

Figura 4. Teores de Clorofila-a (Chl_a), Clorofila-b (Chl_b), clorofila total (Chl_{total}), relação clorofila a/b ($Chl\ a/b$) e carotenoides (Car) em cultivares de *Coffea canephora*, BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210, cultivadas à 80%, 40%, 20% e 10% da capacidade de vaso.

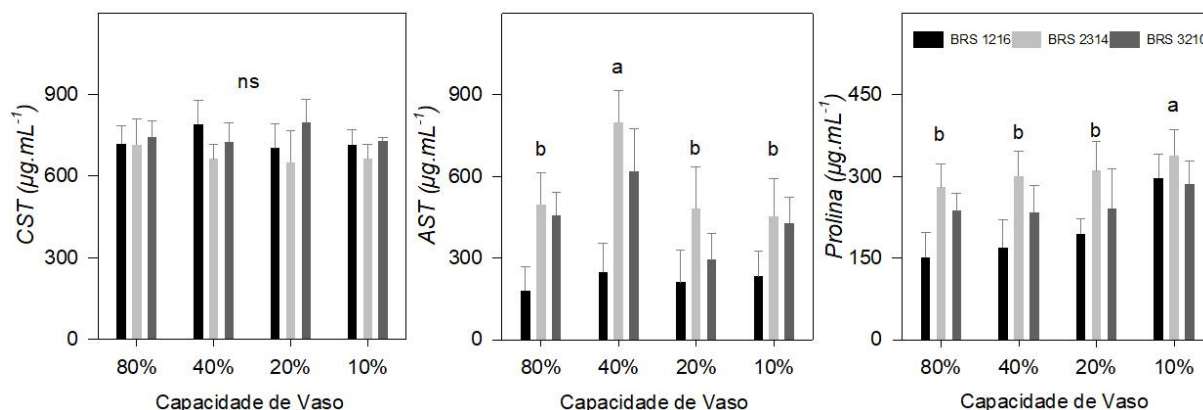


Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

3.4 Metabólitos

A disponibilidade hídrica não influenciou os teores de CST. Com a redução da irrigação do tratamento de 10% da capacidade de vaso houve um aumento significativo nos teores de *Pro*, enquanto os teores de *AST* foram superiores nas plantas cultivadas à 40% da capacidade de vaso (Figura 5).

Figura 5. Teores de carboidratos solúveis totais (CST), aminoácido solúveis totais (AST) e prolina (*Pro*) em cultivares de *Coffea canephora*, BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210, cultivadas à 80%, 40%, 20% e 10% da capacidade de vaso.



Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 3. Valores médios de teores de clorofila-a (Chl_a), clorofila-b (Chl_b), clorofila total (Chl_{total}), relação clorofila a/b ($Chl\ a/b$), carotenoides (Car) carboidratos solúveis totais (CST), aminoácido solúveis totais (AST), prolina (Pro), conteúdo relativo de água (CRA), dano de membrana (DM), massa seca do caule (MS_{caule}), massa seca da folha (MS_{folha}), massa seca da raiz (MS_{raiz}), massa seca total (MS_{total}), alocação de biomassa no caule (AB_{caule}), alocação de biomassa na folha (AB_{folha}), alocação de biomassa na raiz (AB_{raiz}) e relação raiz/parte aérea (R/Pa) em cultivares de *Coffea canephora*, BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210.

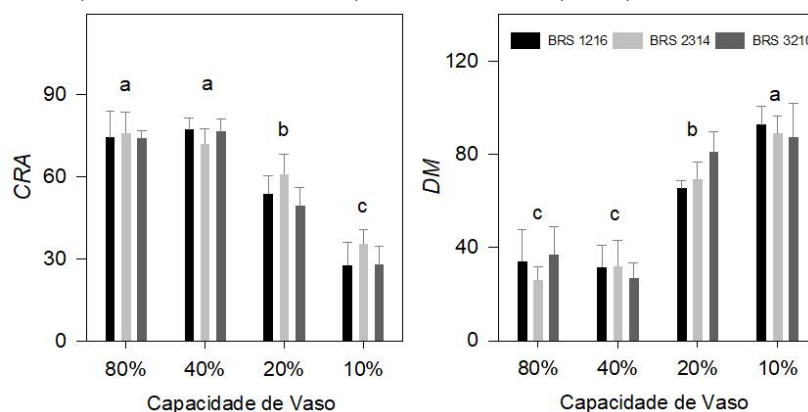
Variáveis	Cultivares		
	BRS 1216	BRS 2314	BRS 3210
Chl_a (mg/g)	4,51	4,92	4,66
Chl_b (mg/g)	1,79	1,80	1,64
Chl_{total} (mg/g)	6,31	6,72	6,30
$Chl\ a/b$	2,60	2,78	2,92
Car (mg/g)	0,26	0,25	0,27
CST (mg/g)	731,76 a	673,63 b	748,67 a
AST (mg/g)	218,07 c	558,07 a	449,32 b
Pro (mg/g)	203,09 c	307,23 a	249,52 b
CRA	58,20	61,06	56,87
DM	51,91	54,12	58,16
MS_{caule} (mg)	7,05 a	4,63 b	6,25 a
MS_{folha} (mg)	16,97 a	11,69 b	15,91 a
MS_{raiz} (mg)	6,39 ab	5,46 b	6,72 a
MS_{total} (mg)	30,42 a	21,77 b	28,87 a
AB_{caule}	22,93	21,22	21,38
AB_{folha}	56,55a	53,46b	55,46ab
AB_{raiz}	20,51c	25,31a	23,14c
R/Pa	0,26 c	0,34 a	0,30 b

Médias seguidas de letras distintas indicam diferença significativa pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

3.5 Conteúdo Relativo de Água e Dano de Membrana

O CRA reduziu com a diminuição da capacidade de campo, sendo mais elevado em 80% e 40% e drasticamente reduzido em 20% e 10%. O DM aumentou à medida que a disponibilidade hídrica diminuiu, com os menores valores observados em 80% e 40% e os maiores em 10% (Figura 6).

Figura 6. Conteúdo relativo de água (CRA) e dano de membrana (DM) em cultivares de *Coffea canephora*, BRS 1216, BRS 2314 e BRS 3210, cultivadas à 80%, 40%, 20% e 10% da capacidade de vaso.

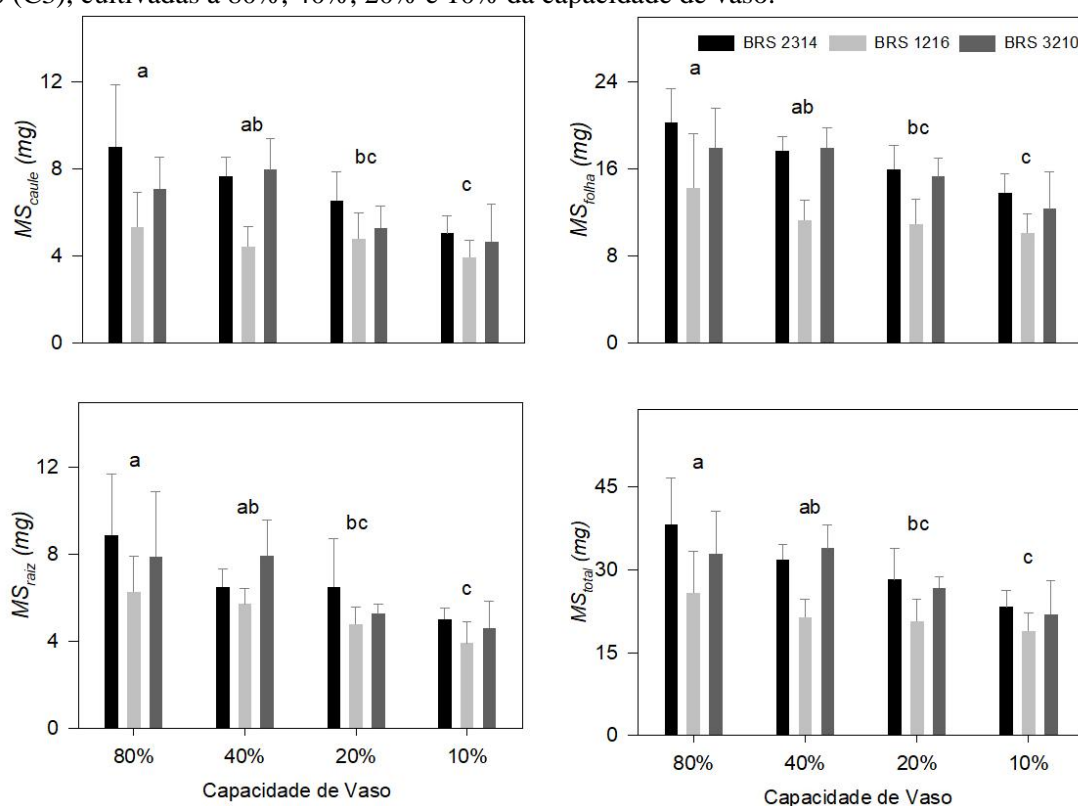


Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

3.6 Crescimento

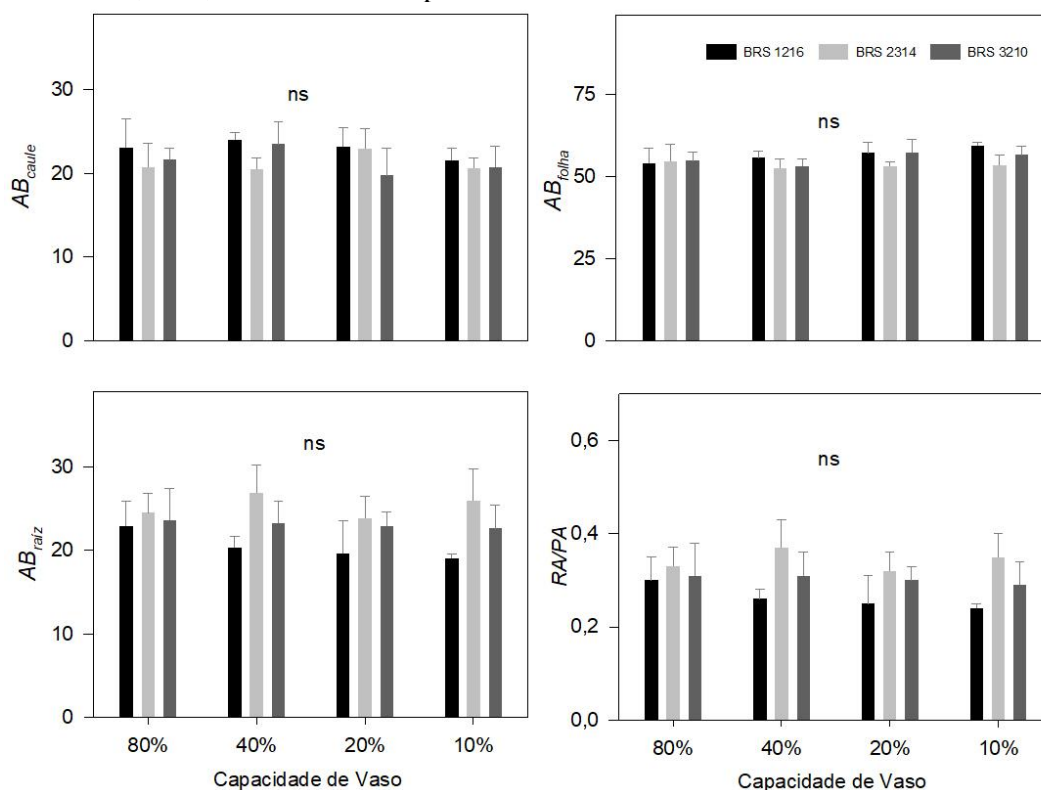
A MS_{caule} , MS_{folha} , MS_{PA} e MS_{total} apresentaram decréscimos com a redução da capacidade de campo (Figura 7). A massa seca da raiz seguiu um padrão similar ao da parte aérea, com maiores valores observados em condições de 80% de campo. No entanto, a magnitude da redução foi menos pronunciada em relação à parte aérea, sugerindo uma adaptação parcial do sistema radicular ao estresse hídrico. A cultivar BRS 2314 apresenta menor acúmulo de biomassa de forma geral, porém, maior relação R/Pa . A alocação de biomassa e a relação R/Pa não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos hídricos.

Figura 7. Massa seca do caule (MS_{caule}), massa seca da folha (MS_{folha}), massa seca da raiz (MS_{raiz}) e massa seca total (MS_{total}) em cultivares de *Coffea canephora*, BRS 1216 (C1), BRS 2314 (C2) e BRS 3210 (C3), cultivadas à 80%, 40%, 20% e 10% da capacidade de vaso.



Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

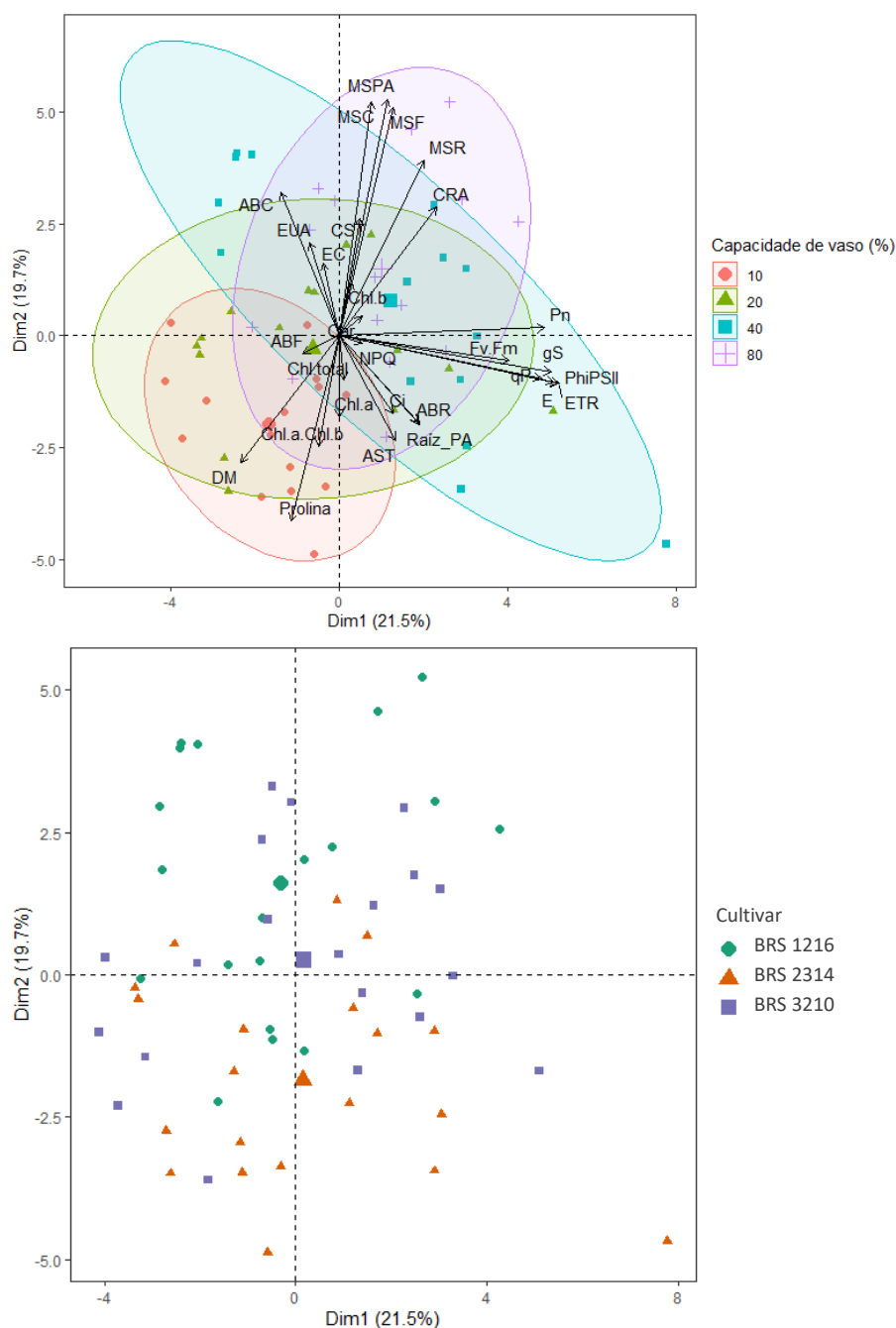
Figura 8. Alocação de biomassa no caule (AB_{caule}), folha (AB_{folha}), e raiz (AB_{raiz}) e relação raiz/parte aérea (R/Pa) em cultivares de *Coffea canephora*, BRS 1216 (C1), BRS 2314 (C2) e BRS 3210 (C3), cultivadas à 80%, 40%, 20% e 10% da capacidade de vaso.



ns: não significativo pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

As variações do conjunto de dados foram apresentadas pelos dois primeiros componentes principais (Dim1 e Dim2), totalizando 41,2% da variação total (Figura 9). Os parâmetros de trocas gasosas foram positivamente correlacionados com os parâmetros de fluorescência da clorofila-a e, surpreendentemente, tiveram forte associação com o tratamento de 40% da capacidade de vaso. O tratamento de 80% da capacidade apresentou maior associação com as variáveis de crescimento e teores de pigmentos fotossintéticos, com uma relação antagônica entre elas. O *CRA* apresentou forte associação com os tratamentos de 40% e 80% da capacidade de vaso, como esperado, se correlacionando negativamente com o *DM*, *Pro*, *AST* e os pigmentos fotossintéticos, embora este último apresentasse menor influência na variação dos dados. Sob estresse hídrico moderado e severo, 20 e 10% da capacidade de vaso, respectivamente, a *Pro* apresentou maior associação, assim como o *DM*. As cultivares não tiveram uma tendência característica na variação total dos dados, reforçando a semelhança entre estes materiais.

Figura 9. Análise de Componentes Principais para a relação entre trocas gasosas, fluorescência da clorofila-a e teores de pigmentos fotossintéticos, metabólitos e crescimento de cultivares de *Coffea canephora* cultivadas à 80%, 40%, 20% e 10% da capacidade de vaso.



Biplots contendo pontuações médias das duas primeiras componentes principais (CP1 e CP2). A: taxa fotossintética; *gS*: condutância estomática; *E*: transpiração; *Ci*: concentração interna de CO₂; *EUA*: eficiência do uso da água; *EC*: eficiência de carboxilação; *Fv.Fm*: eficiência quântica máxima do PSII; *PhiPSII*: eficiência quântica operacional do PSII; *qP*: coeficiente de extinção fotoquímica; *NPQ*: coeficiente de extinção não-fotoquímica; *ETR*: taxa de transporte de elétrons; *Chl.a*: teores de clorofila-a; *Chl.b*: clorofila-b; *Chl.total*: clorofila total; *Chl a.b*: relação clorofila a/b; *Car*: carotenoides; *DM*: dano de membrana; *CRA*: conteúdo relativo de água; *CST*: carboidratos solúveis totais; *AST*: aminoácidos solúveis totais; *Pro*: prolina; *MS_{caule}*: Massa seca do caule; *MS_{folha}*: massa seca da folha; *MS_{raiz}*: massa seca da raiz; *MS_{total}*: massa seca total; *AB_{caule}*: alocação de biomassa no caule; *AB_{folha}*: alocação de biomassa na folha; *AB_{raiz}*: alocação de biomassa na raiz; *Raiz_PA*: relação raiz/parte aérea.

4 Discussão

Os mecanismos fisiológicos são as respostas mais imediatas das plantas ao estresse hídrico. Um dos principais é o fechamento estomático, que reduz a transpiração e, conseqüentemente, a perda de água para a atmosfera. Sob a perspectiva fisiológica, a deficiência de água inicialmente reduz o potencial hídrico foliar (Ψ_w) (SHAO *et al.*, 2008). Essa resposta é mediada pelo ácido abscísico (ABA), um hormônio que é sintetizado em resposta à seca e induz o fechamento dos estômatos (FERNANDES *et al.*, 2021).

Os níveis mais baixos de água no solo resultaram em uma diminuição significativa da assimilação de CO_2 , indicando que o estresse hídrico compromete o desempenho fotossintético das cultivares. A redução de g_s em condições de baixa disponibilidade hídrica evidencia o ajuste estomático da espécie para minimizar a perda de água. No entanto, essa resposta também limita a absorção de CO_2 pelas folhas, resultando em menores taxas de fotossíntese (DEUNER *et al.*, 2011; SOUROUR *et al.*, 2017). A redução de E demonstra a estratégia de economia hídrica das cultivares. A manutenção de níveis mais altos em BRS 2314 indica um melhor ajuste fisiológico, possivelmente relacionado a uma maior capacidade de tolerância ao déficit hídrico. A redução de C_i é consistente com o fechamento estomático, enquanto os aumentos observados em BRS 2314 sob condições severas sugerem um possível acúmulo de CO_2 devido às limitações não estomáticas.

Schmidt *et al.* (2023) também constataram que as cultivares de Robustas Amazônicas ajustam a abertura estomática para reduzir as perdas de água sem comprometer significativamente a fotossíntese. Este processo ocorre de forma coordenada com a manutenção da integridade celular e redução no acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS), favorecendo a manutenção da atividade metabólica.

O aumento da EUA em condições moderadas reflete uma estratégia adaptativa para maximizar a produtividade de carbono por unidade de água utilizada. Em níveis severos, no entanto, a redução de A prejudica essa eficiência. A redução de EC em condições de estresse severo sugere limitações na capacidade de carboxilação da Rubisco devido à menor disponibilidade de CO_2 ou alterações bioquímicas associadas ao estresse. A maior estabilidade de EC em BRS 2314 reforça sua tolerância ao déficit hídrico, indicando menor impacto na capacidade de assimilação de carbono, mesmo em condições adversas. As diferenças pontuais observadas em A e EC destacam nuances no desempenho fotossintético inicial, o que pode estar relacionado a características genéticas específicas de cada clone. No entanto, essas diferenças parecem não impactar significativamente as respostas de eficiência hídrica e trocas gasosas, evidenciando que os clones possuem uma plasticidade fisiológica que contribui para sua adaptação em diferentes condições. Indicando que, embora variações genéticas existam, os clones avaliados podem ser igualmente eficientes em sistemas de produção sob condições ambientais semelhantes.

A ausência de diferenças estatísticas em g_s , E , C_i e EUA entre as cultivares reforça que esses fatores são altamente conservados entre os materiais avaliados, possivelmente devido a similaridades

genéticas ou adaptativas ao ambiente experimental, indicando que os clones possuem estratégias fisiológicas para lidar com condições ambientais semelhantes.

A redução da disponibilidade hídrica provoca uma diminuição nos valores de F_v/F_m , $\Phi PSII$, qP e ETR , o que indica uma limitação progressiva na eficiência fotossintética e no transporte de elétrons. Essa condição reflete o comprometimento da capacidade fotossintética das plantas, resultante da menor disponibilidade de água, que impacta negativamente a fotossíntese e a estabilidade do fotossistema II. Observações semelhantes foram reportadas por Tounekti *et al.* (2018), que constataram que o aumento do estresse hídrico está associado a reduções na extinção fotoquímica (qP), na taxa relativa de transporte de elétrons (ETR), no rendimento quântico efetivo do PSII ($\Phi PSII$) e no rendimento quântico máximo (F_v/F_m).

Os mecanismos morfológicos incluem adaptações estruturais que ajudam as plantas a lidarem com a escassez de água. Um dos mais relevantes é o desenvolvimento de raízes mais profundas e extensas, que permitem a captura de água em camadas mais profundas do solo. Essa adaptação é crítica em regiões com solos rasos ou períodos prolongados de seca (AMAN *et al.*, 2024). O déficit hídrico limita processos fundamentais, como a fotossíntese, o transporte de nutrientes e a expansão celular, levando a uma redução geral no acúmulo de biomassa. A menor queda na massa seca da raiz sugere uma possível adaptação morfológica para maximizar a exploração do solo em busca de água. De acordo com Silva *et al.* (2010), o papel do sistema radicular no desenvolvimento das plantas e na tolerância a estresses ambientais tem ganhado destaque, especialmente em situações em que são utilizados porta-enxertos, devido à sua capacidade de influenciar a absorção de nutrientes, a resistência ao déficit hídrico e a adaptação às condições adversas. A capacidade de desenvolvimento de raízes profundas e ramificadas nos genótipos adaptados permite a extração de água de camadas mais profundas do solo durante períodos de déficit hídrico. A estrutura radicular eficiente é fundamental para garantir o fornecimento de água e nutrientes, reduzindo os impactos do estresse hídrico (GIURIATTO JUNIOR *et al.*, 2020).

De acordo com DaMatta e Ramalho (2006), o estresse hídrico altera a proporção de clorofilas a e b e carotenoides. Para evitar sobrecarga energética nos cloroplastos, as plantas podem reduzir o conteúdo de clorofila, diminuindo, assim, a captação de luz. Segundo Santos *et al.* (2014), a seca também afeta outros componentes do processo fotossintético. O estresse hídrico moderado a severo inibe a biossíntese de clorofila, prejudicando a eficiência de absorção da luz, uma condição que pode ser observada por meio da fluorescência, que reflete a intensidade da fotoinibição. Nesse estudo, mesmo sob condições de déficit hídrico severo (10%), as plantas foram capazes de manter o conteúdo de pigmentos fotossintéticos relativamente estável. Essa estabilidade pode ser resultado de estratégias adaptativas que evitam a degradação dos pigmentos e preservam a funcionalidade do aparato fotossintético. No entanto, o aumento na razão $Chl\ a/b$ sob baixa disponibilidade hídrica indica uma modulação no aparato fotossintético para otimizar a captação de luz, o que pode ser uma resposta direta ao estresse.

O *CRA* diminui progressivamente com a redução da capacidade de campo para todas as cultivares, indicando que níveis mais baixos de disponibilidade hídrica resultam em maior perda de água nos tecidos. Essa resposta reflete uma maior dificuldade das plantas em manter a hidratação celular sob condições de déficit hídrico, sendo especialmente crítica em 10% de capacidade de campo, onde todas as cultivares apresentam valores menores. As diferenças entre os clones podem estar associadas a variações na eficiência dos mecanismos de controle estomático e na capacidade de retenção de água. O *DM*, por outro lado, aumenta conforme a disponibilidade hídrica diminui, especialmente em 10% da capacidade de campo, indicando maior comprometimento na integridade das membranas celulares devido ao estresse hídrico. Isso ocorre porque a redução do *CRA* sob condições de estresse, há um desbalanço entre a produção e eliminação de espécies reativas de oxigênio (EROs) que, em altas concentrações, tornam-se altamente reativas e tóxicas, causando danos principalmente em lipídeos, proteínas e ácidos nucleicos (GILL e TUTEJA, 2010; SOUROUR *et al.*, 2017; SCHNEIDER *et al.*, 2019). Esses danos podem comprometer processos cruciais, como o transporte de íons e a regulação do potencial hídrico, impactando diretamente a funcionalidade fotossintética (SCHNEIDER *et al.*, 2019).

No estudo realizado por Baroni *et al.* (2024), indícios de danos de membrana foram observados através da redução na eficiência fotossintética e na fluorescência da clorofila *a*, sugerindo impacto nas membranas dos cloroplastos. Além de alterações anatômicas, como o aumento da espessura do parênquima paliádico, podem refletir respostas estruturais para mitigar esses danos. Essas adaptações indicam que a integridade das membranas desempenha um papel central na resiliência ao estresse hídrico, especialmente em clones com diferentes níveis de sensibilidade.

As cultivares mostram diferenças na magnitude do dano, com o clone BRS 3210 exibindo melhor desempenho em condições severas (10%), sugerindo maior resistência ao estresse hídrico em comparação aos outros clones. Esses resultados reforçam a importância de selecionar genótipos de *Coffea canephora* mais tolerantes ao déficit hídrico, especialmente em regiões suscetíveis à seca. Estratégias que promovam a mitigação do estresse hídrico, como melhorias no manejo da água ou no desenvolvimento de clones mais resistentes, podem contribuir para a sustentabilidade da produção de café.

Os parâmetros *CST*, *AST* e *Pro*, são importantes indicadores fisiológicos da resposta das plantas ao estresse hídrico, pois refletem alterações metabólicas que conferem tolerância e adaptação ao déficit hídrico. As plantas podem acumular solutos compatíveis, como a prolina e açúcares solúveis, que ajudam a manter a turgidez celular e a proteção de biomoléculas durante o estresse (OZTURK *et al.*, 2020). Os *CST* desempenham papéis importantes como fontes de energia para o metabolismo celular e como osmólitos, ajudando a regular o potencial osmótico nas células sob condições de estresse. No entanto, a ausência de alterações significativas pode indicar que a planta utilizou outras estratégias metabólicas, como a síntese de aminoácidos ou compostos específicos, para lidar com o estresse hídrico. Sob condições de estresse hídrico, o aumento de *AST* pode ser explicado pela degradação de proteínas ou pela síntese de aminoácidos específicos, como parte da resposta adaptativa ao déficit hídrico. Os

aminoácidos também atuam como osmólitos, regulando o potencial osmótico e protegendo estruturas celulares contra o estresse oxidativo. O pico de *AST* em 40% sugere que esta condição representa um nível de estresse moderado, suficiente para ativar respostas metabólicas, mas sem causar danos severos à planta.

A prolina é amplamente reconhecida como um importante osmólito e antioxidante em plantas sob condições de estresse hídrico. Seu acúmulo está associado à manutenção do potencial hídrico celular, à estabilização de membranas e à redução do impacto de espécies reativas de oxigênio, funcionando como osmoprotetor (SOUROUR *et al.*, 2017; MELO *et al.*, 2020). Esses achados corroboram com os relatos de Silva *et al.* (2010), em que sob déficit hídrico severo, os teores de aminoácidos totais e prolina aumentam. Tounekti *et al.* (2018) observaram acúmulo de altos níveis de prolina em folhas de cafeeiros sob déficit hídrico.

Os resultados da tabela 3 sugerem que os clones possuem estratégias metabólicas distintas para lidar com adversidades. Enquanto o BRS 3210 parece priorizar o armazenamento de carboidratos, o BRS 2314 se destaca na produção de compostos relacionados à resposta ao estresse, como aminoácidos e prolina. Essas diferenças podem refletir adaptações genéticas e fisiológicas específicas, que podem ser exploradas para selecionar clones mais adequados a determinadas condições ambientais ou sistemas de manejo.

5 Conclusões

A redução da *gS* em mudas de *Coffea canephora* cultivadas a 40% da capacidade de vaso mostra que os cafeeiros canéforas fecham os estômatos nos primeiros sinais de restrição hídrica e que a condutância dos estômatos é um mecanismo chave para evitar a perda de água nessas plantas, sendo capazes de manter o *CRA* no tecido foliar e evitar o *DM*. Consequentemente, a taxa fotossintética é influenciada pela variação estomática. A redução do nível de água no solo reduz a $\Phi PSII$ e F_v/F_m , sem alterações no *NPQ*. Sob estresse as plantas de café aumentam a relação *Chla/Chlb* e os teores de *Pro*. As cultivares são semelhantes quanto à capacidade fotossintética e eficiência do fotossistema II. A cultivar BRS 2314 tem menor acúmulo total de biomassa, porém, maior relação *R/Pa*, podendo ser indicada para o cultivo em condição de déficit hídrico.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Embrapa Acre e Embrapa Café pelo fornecimento do material de estudo, ao Consórcio Pesquisa Café – ConCafé por viabilizar o desenvolvimento do projeto (20/2018 - Programa Café) e os pesquisadores integrantes do projeto.

Referências

- AGRITEMPO. Sistema de monitoramento agrometeorológico. **Dados meteorológicos:** Acre. Disponível em: < <https://www.agritempo.gov.br/agritempo/index.jsp>>. Acesso em: 4 dez. 2024.
- AMAN, M.; WORKU, M.; SHIMBIR, T.; ASTATKIE, T. Root traits and biomass production of drought-resistant and drought-sensitive arabica coffee varieties growing under contrasting watering regimes. **Agrosyst. Geosci. Environ.**, v. 7, e20488, 2024.
- BARONI, D. F.; SOUZA, G. A. R. de; BERNADO, W. de P.; SANTOS, A. R.; BARCELLOS, L. C. de S.; BARCELOS, L. F. T.; CORREIA, L. Z.; ALMEIDA, C. M. de; VERDIN FILHO, A. C.; RODRIGUES, W. P.; CAMPOSTRINI, E. Stomatal and non-stomatal leaf responses during two sequential water stress cycles in young *Coffea canephora* plants. **Stresses**, v. 4, p. 575–597, 2024. <https://doi.org/10.3390/stresses4030037>
- BATES, L. S. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Short communication, **Plant and Soil**, v. 39, p. 205-207, 1973.
- BONOMO, R.; SOUZA, J. M. Uso eficiente da água na irrigação do cafeeiro Conilon. In: PARTELLI, F. L.; BONOMO, R. **Café conilon: o clima e o manejo da planta**. Alegre, ES: CAUFES, 2016. Cap. 6, p. 93-110.
- CAIRO, P. A. R. **Curso básico de relações hídricas de plantas**. Vitória da Conquista. UESB, 32p, 1995.
- CAVALCANTI, F. R.; OLIVEIRA, J. T. A.; MARTINS-MIRANDA, A. S.; VIÉGAS, R. A.; SILVEIRA, J. A. G. Superoxide dismutase, catalase and peroxidase activities do not confer protection against oxidative damage in salt-stressed cowpea leaves. **New Phytologist**, v. 163, p. 563-571, 2004.
- CHESEREK, J. J.; GICHIMU, B. M. Drought and heat tolerance in coffee: a review. **International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science**, v. 2, n. 12, p. 498-501, 2012.
- CUSTÓDIO, A. M. **Physiological and productivity attributes of amazonian robustas (*Coffea canephora*) cultivated in Rondônia, Brazil**. 2022. Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2022.
- DaMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian journal of plant physiology**, v. 18, n. 1, p. 55-81, 2006.
- DEUNER, S.; ALVES, J. D.; ZANANDREA, I.; GOULART, P. D. F. P.; SILVEIRA, N. M.; HENRIQUE, P. D. C.; MESQUITA, A. C. Stomatal behavior and components of the antioxidative system in coffee plants under water stress. **Scientia Agricola**, v. 68, p. 77-85, 2011.
- DUBOIS, M.; GILLES, K.A.; HAMILTON, J.K.; REBERS, P.A.; SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, v. 28, p. 350-356, 1956.
- ESPINDULA, M. C. *et al.* Condução de cafeeiros *Coffea canephora*. Em: MARCOLAN, A.; ESPINDULA, M. C. **Café na Amazônia**. Brasília: Embrapa, 2015. p. 219-236.
- FERNANDES, I.; MARQUES, I.; PAULO, O. S.; BATISTA, D.; PARTELLI, F. L.; LIDON, F. C.; DaMATTA, F. M.; RAMALHO, J. C.; RIBEIRO-BARROS, A. I. Understanding the Impact of

- Drought in *Coffea* Genotypes: Transcriptomic Analysis Supports a Common High Resilience to Moderate Water Deficit but a Genotype Dependent Sensitivity to Severe Water Deficit. **Agronomy**, v. 11, n. 11, 2255, 2021.
- GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant physiology and biochemistry**, v. 48, n. 12, p. 909-930, 2010.
- GIURIATTO JUNIOR, J. J. T.; ESPINDULA, M. C.; ARAUJO, L. F. B. de; VASCONCELOS, J. M.; CAMPANHARO, M. Growth and physiological quality in clonal seedlings of Robusta coffee. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, n. 4, e20196920, 2020.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA: Produção agrícola municipal. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 22 out. 2024.
- LICHTENTHALER, H. K.; WELLBURN, A. R. Determination of total carotenoids and chlorophyll a and b of leaf extracts in different solvents. **Biochemical Societ Transactions**, p. 591-603, 1983.
- MARCOLAN, A. L.; RAMALHO, A. R.; MENDES, A. M.; TEIXEIRA, C. A. D.; FERNANDES, C. F.; COSTA, J. N. M.; VIEIRA JÚNIOR, J. R.; OLIVEIRA, S. J. M.; FERNANDES, S. R.; VENEZIANOET, W. **Cultivo dos Cafeeiros Conilon e Robusta para Rondônia**. 3 ed. Porto Velho: EMBRAPA/EMATER (Sistema de Produção), 2009. 61 p.
- MELO, B. P.; LOURENÇO-TESSUTTI, I. T.; PAIXÃO, J. F. R.; NORIEGA, D. D.; SILVA, M. C. M.; DE ALMEIDA-ENGLER, J.; GROSSI-DE-SA, M. F. Transcriptional modulation of AREB-1 by CRISPRa improves plant physiological performance under severe water deficit. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 1-10, 2020.
- OLIVEIRA, L. N. L.; ROCHA, R. B.; FERREIRA, F. M.; SPINELLI, V. M.; RAMALHO, A. R.; TEIXEIRA, A. L. Selection of *Coffea canephora* parents from the botanical varieties Conilon and Robusta for the production of intervarietal hybrids. **Ciência Rural**, v. 48, p. 1-7, 2018.
- OZTURK, M.; UNAL, B. T.; GARCÍA-CAPARRÓS, P.; KHURSHED, A.; GUL, A.; HASANUZZAMAN, M. Osmoregulation and its actions during the drought stress in plants. **Physiologia Plantarum**, v. 172, n. 2, p. 1321-1335, 2020.
- ROCHA, R. B.; TEIXEIRA, A. L.; RAMALHO, A. R.; SOUZA, F. F. Melhoramento de *Coffea canephora*: considerações e metodologias. Em: MARCOLAN, A. L.; ESPINDULA, M. C. **Café na Amazônia**. Embrapa, Porto Velho, 2015. p. 101-126.
- RONCHI, C. P.; DaMATTa, F. M. Aspectos Fisiológicos do Café Conilon. In: FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A.; FERÃO, M. A. G.; MUNER, L. H. (Ed.). **Café conilon**. 2ª ed, atual. e ampl. Vitória, ES: Incaper, 2017. 784 p. Cap. 5, p. 103-129.
- SANTOS, C. M.; SILVA, M. A.; LIMA, G. P. P.; BORTOLHEIRO, F. P. D. A. P.; BRUNELLI, M. C.; HOLANDA, L. A.; OLIVER, R. Physiological changes associated with antioxidant enzymes in response to sugarcane tolerance to water deficit and rehydration. **Sugar Tech**, v. 17, n. 3, p. 291-304, 2014.

- SANTOS, M. de O.; COELHO, L. S.; CARVALHO, G. R.; BOTELHO, C. E.; TORRES, L. F.; VILELA, D. J. M.; ANDRADE, A. C.; SILVA, V. A. Photochemical efficiency correlated with candidate gene expression promote coffee drought tolerance. **Scientific Reports**, v. 11, n. 7436, 2021.
- SCHMIDT, R.; SILVA, C. A. da; SILVA, L. O. E.; ESPINDULA, M. C.; RODRIGUES, W. P.; VIEIRA, H. D.; TOMAZ, M. A.; PARTELLI, F. L. Accumulation of nutrients and the relation between fruit, grain, and husk of coffee Robusta cultivated in Brazilian Amazon. **Plants**, v. 12, 3476, 2023.
- SCHNEIDER, J. R.; CAVERZAN, A.; CHAVARRIA, G. Water deficit stress, ROS involvement, and plant performance. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 65, n. 8, p. 1160-1181, 2019.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality. (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3 e 4, p. 591-611, 1965.
- SCHREIBER, U.; BILGER, W. & NEUBAUER, C. Chlorophyll fluorescence as a non-destructive indicator of rapid assessment of in vitro photosynthesis, p. 49–70. In: E.D. Schulze and M.M. Caldwell (eds.). **Ecophysiology of photosynthesis**. Ecological Studies 100. Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- SHAO, H. B.; CHU, L. Y.; JALEEL, C. A.; ZHAO, C. X. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. **Comptes rendus biologies**, v. 331, n. 3, p. 215-225, 2008.
- SILVA, V. A.; ANTUNES, W. C.; GUIMARÃES, B. L. S.; PAIVA, R. M. C.; SILVA, V. de F.; FERRÃO, M. A. G.; DaMATTA, F. M.; LOUREIRO, M. E. Resposta fisiológica de clone de café Conilon sensível à deficiência hídrica enxertado em porta-enxerto tolerante. **Pesq. agropec. bras.**, v.45, n.5, p.457-464, 2010.
- SOUROUR, A.; AFEF, O.; MOUNIR, R.; MONGI, B. Y. A review: morphological, physiological, biochemical and molecular plant responses to water deficit stress. **The International Journal of Engineering And Science**, v. 6, n. 1, p. 1-4, 2017.
- TADEU, H. C.; XIMENES, V. F.; LOPES, M. T. G.; ESPINDULA, M. C.; ALVES, A. P. de C.; BORÉM, F. M. Analysis of bioactive compounds, organic acids, and genetic parameters of ten Amazonian robusta cultivars. **Revista Caatinga**, v. 37, e12017, 2024.
- TEIXEIRA, A. L.; ROCHA, R. B.; ESPINDULA, M. C.; RAMALHO, A. R.; VIEIRA JUNIOR, J. R.; ALVES, E. A.; LUNZ, A. M. P.; SOUZA, F. de F.; COSTA, J. N. M.; FERNANDES, C. de F. Amazonian Robustas - new *Coffea canephora* coffee cultivars for the Western Brazilian Amazon. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 20, n. 3, e323420318, 2020.
- TETENS, O. Über einige meteorologische Begriffe. **Zeitschrift für Geophysik**, v. 6, n. 1, p. 297-309, 1930.
- TOUNEKTI, T.; MAHDHI, M.; AL-TURKI, T. A.; KHEMIRA, H. Water relations and photo-protection mechanisms during drought stress in four coffee (*Coffea arabica*) cultivars from southwestern Saudi Arabia. **South African journal of botany**, v. 117, p. 17-25, 2018.
- YEMM, E.W.; COCKING, E.F. The determination of amino acids with ninhydrin. **Analyst**, v. 80, p. 209-213, 1955.

MATERIAL COMPLEMENTAR

Tabela 1C. Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis de fotossíntese e fluorescência de *Coffea canephora* cultivadas sob diferentes níveis de água no solo.

Fonte de Variação	GL	QM										
		Dia 0										
		<i>A</i>	<i>gS</i>	<i>E</i>	<i>Ci</i>	<i>EUA</i>	<i>EC</i>	$\phi PSII$	<i>ETR</i>	<i>qP</i>	<i>Fv_Fm</i>	<i>NQP</i>
Capacidade de Campo (CC)	3	4,52	0,002	0,66	4,87	0,26	0,009	0,001	356,57	0,005*	0,00003	0,07
Clone (C)	2	53,81**	0,02**	10,82**	19,55	0,49	0,03*	0,003**	847,06**	0,01**	0,002*	0,18*
CC x C	6	7,38	0,002	1,01	3,04	0,17	0,007	0,0005	141,18	0,002	0,0003	0,04
Erro	48	2,92	0,002	0,91	13,44	0,25	0,009	0,0006	164,2	0,002	0,0004	0,05
Total	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV (%)	-	17,59	31,75	23,05	14,18	20,8	24,92	25,9	25,9	29,08	2,67	50,5
		Dia 7										
		<i>A</i>	<i>gS</i>	<i>E</i>	<i>Ci</i>	<i>EUA</i>	<i>EC</i>	$\phi PSII$	<i>ETR</i>	<i>qP</i>	<i>Fv_Fm</i>	<i>NQP</i>
		<i>A</i>	<i>gS</i>	<i>E</i>	<i>Ci</i>	<i>EUA</i>	<i>EC</i>	$\phi PSII$	<i>ETR</i>	<i>qP</i>	<i>Fv_Fm</i>	<i>NQP</i>
Capacidade de Campo (CC)	3	26,87 **	0,008 **	5,35**	57,9	1,62	0,03	0,003**	794,96**	0,008*	0,001	0,15
Clone (C)	2	42,91**	0,007**	4,58**	62,94	2,95	0,02	0,003**	797,15**	0,006	0,003*	0,49
CC x C	6	6,43	0,0008	0,57	13,5	3,94	0,02	0,0007	184,2	0,002	0,001	0,3
Erro	48	3,28	0,0008	0,62	35,32	2,43	0,02	0,0006	150,62	0,003	0,0007	0,35
Total	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV (%)	-	24,39	37,67	32,99	28,41	45,5	39,86	28,87	28,88	34,71	3,48	77,13
		Dia 13										
		<i>A</i>	<i>gS</i>	<i>E</i>	<i>Ci</i>	<i>EUA</i>	<i>EC</i>	$\phi PSII$	<i>ETR</i>	<i>qP</i>	<i>Fv_Fm</i>	<i>NQP</i>
		<i>A</i>	<i>gS</i>	<i>E</i>	<i>Ci</i>	<i>EUA</i>	<i>EC</i>	$\phi PSII$	<i>ETR</i>	<i>qP</i>	<i>Fv_Fm</i>	<i>NQP</i>
Capacidade de Campo (CC)	3	85,44**	0,07**	36,27**	431,25**	10,08**	0,004	0,002**	584,31**	0,0036	0,0003	0,06
Clone (C)	2	31,22**	0,003	3,22**	5,41	0,29	0,04	0,003**	897,28**	0,008*	0,002*	0,09
CC x C	6	1,22	0,001	0,66	9,95	0,56	0,003	0,0002	39,94	0,0004	0,0002	0,05
Erro	48	3,46	0,001	0,58	15,28	0,42	0,01	0,0006	148,27	0,002	0,0004	0,06
Total	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV (%)	-	24,38	37,73	28,9	18,16	19,8	32,91	32,5	32,5	36,3	2,54	66,82

Continuação...												
Dia 23												
		<i>A</i>	<i>gS</i>	<i>E</i>	<i>Ci</i>	<i>EUA</i>	<i>EC</i>	$\phi PSII$	<i>ETR</i>	<i>qP</i>	<i>Fv_Fm</i>	<i>NQP</i>
Capacidade de Campo (CC)	3	96,97**	0,01**	7,36**	41,95	3,23	0,16**	0,006**	1460,71**	0,011**	0,008*	0,31
Clone (C)	2	3,97*	0,0003	0,18	38,22	5,79	0,008	0,0003	70,58	0,0008	0,004	0,48
CC x C	6	2,67	0,0003	0,18	98,30	3,03	0,009	0,00003	8,93	0,002	0,003	0,55
Erro	48	1,15	0,0001	0,11	24,14	2,14	0,007	0,0003	70,03	0,001	0,002	0,19
Total	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV (%)	-	29,2	34,63	35,11	25,07	36,46	42,09	31,83	31,85	31,85	6,69	43,75
Dia 28												
		<i>A</i>	<i>gS</i>	<i>E</i>	<i>Ci</i>	<i>EUA</i>	<i>EC</i>	$\phi PSII$	<i>ETR</i>	<i>qP</i>	<i>Fv_Fm</i>	<i>NQP</i>
Capacidade de Campo (CC)	3	107,46**	0,02**	18,18**	21,76	0,37	0,11**	0,009**	2280,44**	0,018**	0,032**	0,038
Clone (C)	2	1,38	0,0004	0,41	21,45	1,22	0,01	0,0003	70,25	0,001	0,004	0,14
CC x C	6	1,73	0,0002	0,24	54,23	1,15	0,01	0,0004	103,78	0,001	0,004	0,13
Erro	48	2,27	0,0006	0,41	44,36	1,48	0,02	0,0003	69,04	0,001	0,002	0,16
Total	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV (%)	-	33,36	47,25	38,48	29,43	43,15	68,53	33,63	33,62	42,04	6,97	62,1
Dia 35												
		<i>A</i>	<i>gS</i>	<i>E</i>	<i>Ci</i>	<i>EUA</i>	<i>EC</i>	$\phi PSII$	<i>ETR</i>	<i>qP</i>	<i>Fv_Fm</i>	<i>NQP</i>
Capacidade de Campo (CC)	3	119,50**	0,03**	17,78**	297,36**	1,83	0,44**	0,008**	2165,21**	0,02**	0,19**	0,19
Clone (C)	2	5,22	0,0001	0,59	39,67	2,86	0,14	0,0009*	248,23*	0,002*	0,0007	0,02
CC x C	6	5,18	0,0001	0,3	107,42	2,65	0,06	0,0002	40,42	0,0007	0,006	0,21
Erro	48	2,81	0,0006	0,48	71,66	2,39	0,09	0,0002	60,55	0,0008	0,005	0,17
Total	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV (%)	-	30,83	42,36	40,51	41,55	45,34	111,76	38,34	38,35	39,41	10,74	80,71

* e ** indica significância à $p < 0,05$ e $< 0,01$, respectivamente, pelo teste F (ANOVA). *A*, fotossíntese; *gS*, condutância estomática; *E*, transpiração; *Ci*, Concentração interna de CO₂; *EUA*, eficiência do uso da água; *EC*, eficiência de carboxilação;; $\phi PSII$, eficiência quântica operacional do PSII; *ETR*, taxa de transporte de elétrons; *qP*, quënting fotoquímico;; *Fv/Fm*, Eficiência quântica máxima do PSII e *NQP*, quënting não fotoquímico.

Tabela 2C. Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis de biomassa de cultivares de *Coffea canephora* cultivadas sob diferentes níveis de água no solo.

Fonte de Variação	GL	QM							
		<i>MSC</i>	<i>MSF</i>	<i>MSR</i>	<i>MST</i>	<i>AB_{caule}</i>	<i>AB_{folha}</i>	<i>AB_{raiz}</i>	<i>R/Pa</i>
Capacidade de Campo (CC)	3	20,66**	79,32**	25,08**	338,42**	7,34	22,43	8,02	0,002
Clone (C)	2	30,57**	156,07**	8,57*	425,07**	17,93*	48,98**	115,64**	0,03**
CC x C	6	3,61	5,1	2,93	30,51	8,66	12,61	8,18	0,002
Erro	48	2,1	7,25	2,65	27,66	5,15	9,39	7,38	0,002
Total	59	-	-	-	-	-	-	-	-
CV (%)	-	24,26	18,12	26,32	19,47	10,39	5,56	11,82	15,56

* e ** indica significância à $p < 0,05$ e $< 0,01$, respectivamente, pelo teste F (ANOVA). *MSC*, massa seca do caule; *MSF*, massa seca da folha; *MSR*, massa seca da raiz; *MST*, massa seca total; *AB_{caule}*, alocação de biomassa no caule; *AB_{folha}*, alocação de biomassa na folha; *AB_{raiz}*, alocação de biomassa na raiz; *R/Pa*, relação raiz parte aérea.

Tabela 3C. Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis fisiológicas e bioquímicas de cultivares de *Coffea canephora* cultivadas sob diferentes níveis de água no solo.

Fonte de Variação	GL	QM									
		<i>Chl a</i>	<i>Chl b</i>	<i>Chl total</i>	<i>Chl a/b</i>	<i>CAR</i>	<i>DM</i>	<i>CRA</i>	<i>CST</i>	<i>AST</i>	<i>Pro</i>
Capacidade de Campo (CC)	3	0,66	0,18	0,6	0,88*	0,00008	13029,26**	6719,74**	1888,92	149604,56**	20651,55**
Clone (C)	2	0,84	0,16	1,1	0,54	0,0015	82,14	91,65	30985,75**	603008,9**	54431,05**
CC x C	6	0,52	0,06	0,71	0,23	0,001	158,95	75,8	7659,89	36365,48*	2984,66
Erro	48	0,52	0,13	0,88	0,29	0,002	89,39	41,58	5585,4	13547,12	2233,4
Total	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV (%)	-	15,29	20,69	14,53	19,51	15,7	16,86	10,98	10,41	28,49	18,66

* e ** indica significância à $p < 0,05$ e $< 0,01$, respectivamente, pelo teste F (ANOVA). *Chl a*, Clorofila-a; *Chl b*, Clorofila-b; *Chl total*, clorofila total; *Chl a/b*, relação clorofila a/b; *Car*, carotenoides; *DM*, dano de membrana; *CRA*, conteúdo relativo de água; *CST*, carboidratos solúveis totais; *AST*, aminoácido solúveis totais; *Pro*, prolina.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta pesquisa indicaram que, embora algumas variáveis apresentassem diferenças pontuais, como maior eficiência fotossintética das cultivares BRS 1216 e BRS 2314, a maioria dos parâmetros avaliados não diferem. Isso sugere que as cultivares possuem mecanismos fisiológicos mantidos, incluindo regulação estomática e controle hídrico, que os tornam igualmente capazes de lidar com condições moderadas de déficit hídrico. Além disso, a ausência de diferenças em algumas variáveis bioquímicas, como os teores de clorofila e prolina, reforça a uniformidade adaptativa entre os clones. Enquanto as semelhanças refletem estratégias de sobrevivência, as diferenças pontuais podem ser exploradas para selecionar variedades com desempenho superior em condições específicas de cultivo. A análise integrada dos parâmetros fisiológicos e bioquímicos destacou o potencial de todas as cultivares para uso em sistemas produtivos, mas com a possibilidade de ajustes no manejo conforme as características genéticas e ambientais. Conclui-se que a cultivar BRS 3210 demonstra priorizar o armazenamento de carboidratos, enquanto BRS 2314 se destaca na produção de compostos relacionados à resposta ao estresse, como aminoácidos. Esta última tem menor acúmulo total de biomassa, porém, maior relação R/Pa, podendo ser uma alternativa para cultivo em condições de sequeiro. Esses resultados evidenciam a diversidade de mecanismos adaptativos entre os genótipos, reforçando a importância de entender suas particularidades para o manejo e melhoramento genético.

REFERÊNCIAS

- BERTOLLI, S. C.; RAPCHAN, G. L.; SOUZA, G. M. Photosynthetic limitations caused by different rates of water-deficit induction in *Glycine max* and *Vigna unguiculata*. **Photosynthetica**, v. 50, n. 3, p. 329–336, 2012.
- BONOMO, D. Z.; BONOMO, R.; PEZZOPANE, J. R. M.; SOUZA, J. M. Alternativas de manejo de água de irrigação em cultivos de conilon. **Coffee Science**, v. 9, p. 537-545, 2014.
- BONOMO, R.; SOUZA, J. M. Uso eficiente da água na irrigação do cafeeiro Conilon. In: PARTELLI, F. L.; BONOMO, R. **Café conilon: o clima e o manejo da planta**. Alegre, ES: CAUFES, 2016. Cap. 6, p. 93-110.
- CHEKOL, H.; WARKINEH, B.; SHIMBER, T.; MIEREK-ADAMSKA, A.; DABROWSKA, G. B.; DEGU, A. Drought Stress Responses in Arabica Coffee Genotypes: Physiological and Metabolic Insights. **Plants**, v. 13, n. 6, 828, 2024.
- CHESEREK, J. J.; GICHIMU, B. M. Drought and heat tolerance in coffee: a review. **International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science**, v. 2, n. 12, p. 498-501, 2012.
- Companhia Nacional de Abastecimento**. Acompanhamento da safra brasileira de café. Brasília, DF: CONAB, v. 12, n. 1, 2025.
- CUSTÓDIO, A. M. **Physiological and productivity attributes of amazonian robustas (*Coffea canephora*) cultivated in Rondônia, Brazil**. 2022. Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2022.
- DAVIS, A. P.; TOSH, J.; RUCH, N.; FAY, M. F. Growing coffee: *Psilanthus* (Rubiaceae) subsumed on the basis of molecular and morphological data: implications for the size, morphology, distribution and evolutionary history of *Coffea*. **Botanical Journal of the Linnean Society**, London, v. 167, n. 1, p. 357-377, 2011.
- DEUNER, S.; ALVES, J. D.; ZANANDREA, I.; GOULART, P. D. F. P.; SILVEIRA, N. M.; HENRIQUE, P. D. C.; MESQUITA, A. C. Stomatal behavior and components of the antioxidative system in coffee plants under water stress. **Scientia Agricola**, v. 68, p. 77-85, 2011.
- GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant physiology and biochemistry**, v. 48, n. 12, p. 909-930, 2010.
- Instituto Nacional de Meteorologia**. Estações Automáticas. 2023. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>. Acesso em julho de 2023.
- MARCOLAN, A. L. *et al.* **Cultivo dos cafeeiros conilon e robusta para Rondônia**. Porto Velho, RO: Embrapa Rondônia/Emater - RO, 2009. 67 p.
- MELO, B. P.; LOURENÇO-TESSUTTI, I. T.; PAIXÃO, J. F. R.; NORIEGA, D. D.; SILVA, M. C. M.; DE ALMEIDA-ENGLER, J.; ... GROSSI-DE-SA, M. F. Transcriptional modulation of AREB-1 by

- CRISPRa improves plant physiological performance under severe water deficit. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 1-10, 2020.
- ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE CAFÉ (2024). **What's New**. Disponível em: <<http://www.ico.org/>>. Acesso em: 10 dez. 2024.
- OLIVEIRA, L. N. L.; ROCHA, R. B.; FERREIRA, F. M.; SPINELLI, V. M.; RAMALHO, A. R.; TEIXEIRA, A. L. Selection of *Coffea canephora* parents from the botanical varieties Conilon and Robusta for the production of intervarietal hybrids. **Ciência Rural**, v. 48, p. 1-7, 2018.
- OLIVEIRA, S. J. M.; ARAUJO, L. V. Aspectos econômicos da cafeicultura. In: MARCOLAN, A. L.; ESPINDULA, M. C. **Café na Amazônia**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Cap. 1, p. 27-37.
- SILVA, M. J. G.; SARAIVA, F. A. M.; SILVA, A. A. G.; SANTOS NETO, L. A.; QUERINO, C. A. S. Clima. In: MARCOLAN, A. L.; ESPINDULA, M. C. **Café na Amazônia**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Cap. 2, p. 41-56.
- SOUZA, F. F. Melhoramento de *Coffea canephora*: considerações e metodologias. Em: MARCOLAN, A. L.; ESPINDULA, M. C. **Café na Amazônia**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Cap. 5, p. 101-126.
- RONCHI, C. P.; DaMATTa, F. M. Aspectos Fisiológicos do Café Conilon. In: FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A.; FERÃO, M. A. G.; MUNER, L. H. (Ed.). **Café conilon**. 2ª ed, atual. e ampl. Vitória, ES: Incaper, 2017. 784 p. Cap. 5, p. 103-129.
- SANTOS, C. M.; SILVA, M. A.; LIMA, G. P. P.; BORTOLHEIRO, F. P. D. A. P.; BRUNELLI, M. C.; HOLANDA, L. A.; OLIVER, R. Physiological changes associated with antioxidant enzymes in response to sugarcane tolerance to water deficit and rehydration. **Sugar Tech**, v. 17, n. 3, p. 291-304, 2014.
- SCHNEIDER, J. R.; CAVERZAN, A.; CHAVARRIA, G. Water deficit stress, ROS involvement, and plant performance. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 65, n. 8, p. 1160-1181, 2019.
- SHAO, H. B.; CHU, L. Y.; JALEEL, C. A.; ZHAO, C. X. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. **Comptes rendus biologiques**, v. 331, n. 3, p. 215-225, 2008.
- SOUROUR, A.; AFEF, O.; MOUNIR, R.; MONGI, B. Y. A review: morphological, physiological, biochemical and molecular plant responses to water deficit stress. **The International Journal Of Engineering And Science**, v. 6, n. 1, p. 1-4, 2017.
- TADEU, H. C.; XIMENES, V. F.; LOPES, M. T. G.; ESPINDULA, M. C.; ALVES, A. P. de C.; BORÉM, F. M. Analysis of bioactive compounds, organic acids, and genetic parameters of ten amazonian robusta cultivars. **Revista Caatinga**, v. 37, e12017, 2024.
- TEIXEIRA, A. L.; ROCHA, R. B.; ESPINDULA, M. C.; RAMALHO, A. R.; VIEIRA JUNIOR, J. R.; ALVES, E. A.; LUNZ, A. M. P.; SOUZA, F. de F.; COSTA, J. N. M.; FERNANDES, C. de F. Amazonian Robustas - new *Coffea canephora* coffee cultivars for the Western Brazilian Amazon. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 20, n. 3, 2020.

- THIOUNE, E.; MCCARTHY, J.; GALLAGHER, T.; OSBORNE, B. A humidity shock leads to rapid, temperature dependent changes in coffee leaf physiology and gene expression. **Tree Physiology**, v. 37, 2017.
- TOUNEKTI, T.; MAHDHI, M.; AL-TURKI, T. A.; KHEMIRA, H. Water relations and photo-protection mechanisms during drought stress in four coffee (*Coffea arabica*) cultivars from southwestern Saudi Arabia. **South African journal of botany**, v. 117, p. 17-25, 2018.