TOLERÂNCIA À SECA EM *Coffea canephora*: DESEMPENHO FOTOSSINTÉTICO CONTRASTA ENTRE CLONES COMERCIAIS

Vinicius Sartori Fioresi, Guilherme Cordenonsi da Fonseca, Jônatas Gomes Santos, Lidiane dos Santos Gomes Oliveira, Adésio Ferreira, Marcia Flores da Silva Ferreira

Laboratório de Genética e Melhoramento de Plantas, Departamento de Agronomia, Centro de Ciências Agrarias e Engenharias, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES, Brasil.
vinicius_fioresi@hotmail.com, guicf13@gmail.com, gomesjonatas21@gmail.com, lidianegomes31@gmail.com, adesioferreira@gmail.com, marcia.ferreira@ufes.br

Resumo

Coffea canephora tem sua produtividade fortemente afetada pela disponibilidade hídrica, tornando essencial identificar genótipos com maior tolerância à seca. Neste estudo, avaliaram-se as trocas gasosas de oito clones comerciais (LB1, CM1, BA, 143, V3, V6, K61 e R28) submetidos aos tratamentos Controle e Estresse Hídrico, por meio de IRGA, além de avaliação visual das plantas ao final do período experimental. Os clones V3 e V6 destacaram-se como os mais tolerantes, mantendo as maiores taxas fotossintéticas sob déficit, com aumento da eficiência do uso da água em V3. Em contraste, CM1 e LB1 apresentaram fotossíntese líquida negativa e sintomas visuais acentuados de murcha, enquanto K61, apesar do maior potencial fotossintético em condição controle, mostrou-se o mais sensível. Os resultados evidenciam variabilidade genotípica quanto à tolerância ao déficit e reforçam o potencial das trocas gasosas associadas à avaliação visual como ferramentas de triagem para programas de melhoramento genético.

Palavras-chave: Fotossíntese líquida. Condutância estomática. Eficiência do uso da água. Melhoramento genético.

Área do Conhecimento: Ciências Biológicas - Fisiologia

Introdução

O Brasil é o maior produtor (38,1% da produção mundial) e exportador (31% do volume mundial) e, terceiro maior consumidor (13,3%) de café do mundo (USDA, 2023). O estado do Espírito Santo se destaca da produção de café no cenário mundial sendo responsável por cerca de 70% da produção nacional de *Coffea canephora* (conilon) e aproximadamente 15% da produção mundial do mesmo (Venancio *et al.*, 2020). São 283 mil hectares plantados de café distribuídos em 40 mil propriedades rurais, gerando cerca de 250 mil empregos diretos e indiretos, com uma contribuição de cerca de 37% do PIB agrícola do estado (INCAPER, 2023).

Coffea canephora apresenta uma diversidade genética considerável, que pode ser explicada por sua alogamia natural, um resultado da auto-incompatibilidade gametofítica governada pelo alelo S (Depolo *et al.*, 2022). A diversidade observada também pode ser justificada pela ampla distribuição demográfica desta espécie, que é uma das mais amplas dentro do gênero *Coffea*, podendo ser observada em trabalhos realizado com espécies do gênero ao redor do mundo (Scalabrin *et al.*, 2020; Kiwuka *et al.*, 2021; Al-Ghamedi *et al.*, 2023).

Diferentes estresses abióticos, como frio, calor, seca, inundação e sal, podem causar distúrbios celulares comuns e estresses secundários, incluindo danos à membrana, geração e danos de espécies reativas de oxigênio, desnaturação de proteínas e estresse osmótico em nível celular (De Melo *et al.*, 2022). As diferentes respostas em plantas estão compreende uma rede de diferentes níveis, como defesas celulares, fisiológicas e morfológicas. Alguns autores sugerem que as respostas celulares inatas mais generalizadas e conservadas em plantas dependem da cutícula (proteção externa), desnaturação lipídica da membrana para remodelamento da membrana, ativação de sistemas antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos contra ROS (espécies reativas de oxigênio), indução de chaperonas moleculares e acúmulo de osmólitos compatíveis com a demanda celular (De Melo *et al.*, 2022; He; He; Ding, 2018).

O déficit hídrico pode limitar a fotossíntese impedindo o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Pinheiro; Chaves, 2011; Xu; Fu, 2022). A redução da assimilação líquida de CO2 que é gerada

pela diminuição da difusão de CO2 nos cloroplastos, local também em que acontece carboxilação, normalmente é gerado pelo fechamento dos estômatos e pelo aumento da resistência à difusão do mesofilo foliar (Pinheiro; Chaves, 2011; Xu; Fu, 2022). O principal sumidouro de elétrons fotossintéticos é a fotossíntese, folhas sob estresse hídrico com diminuição da fotossíntese são submetidas a excesso de energia, levando à formação de ROS (espécies reativas de oxigênio) que podem afetar a síntese de ATP (Lawlor; Tezara, 2009; Osakabe *et al.*, 2014).

A ausência de conhecimento genético profundo sobre as variações e respostas de resistência e tolerância em *C. canephora* é uma das lacunas de conhecimento, que dificultam o melhoramento genético. Nesse cenário, a identificação de clones tolerantes ao déficit hídrico constitui etapa essencial para os programas de melhoramento genético voltados à obtenção de materiais mais resilientes. As trocas gasosas figuram entre as ferramentas fisiológicas mais utilizadas para essa finalidade, uma vez que parâmetros como fotossíntese líquida, condutância estomática e eficiência do uso da água refletem, de forma sensível e precoce, as respostas das plantas ao estresse hídrico. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo avaliar as trocas gasosas de oito clones comerciais de *C. canephora* submetidos a estresse hídrico por suspensão de irrigação, visando identificar materiais com maior potencial de tolerância à seca.

Metodologia

Material vegetal e delineamento experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, utilizando mudas de oito clones comerciais de *Coffea canephora:* LB1, CM1, BA (Barreirinha), 143, V3, V6, K61 e R28, cultivadas em vasos de 5 litros contendo substrato composto pela mistura, na proporção 1:1, de substrato comercial e terra de subsolo peneirada. O substrato comercial utilizado era composto por turfa de Sphagnum, vermiculita, casca de arroz carbonizada e hidrofibra, acrescido de NPK e calcário, com densidade variável em torno de 0,8 e pH entre 5,5 e 6,0. Após um período de aclimatação, as plantas foram submetidas a dois tratamentos hídricos: Controle, com irrigação mantida próxima à capacidade de campo (CC), 80% da CC, e Estresse Hídrico, com suspensão total da irrigação até o surgimento de sinais visuais de estresse. Foram utilizadas duas repetições (plantas) por clone no tratamento Controle e três repetições por clone no tratamento de Estresse Hídrico. Os vasos foram distribuídos de forma aleatorizada em casa de vegetação para minimizar efeitos de microambiente sobre os resultados.

Análise de Trocas gasosas (IRGA)

As trocas gasosas foram avaliadas por meio de um analisador de gases por infravermelho (IRGA), modelo LI-6400XT, em condições padronizadas de densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD = 1.000 µmol m^{-2} s^{-1}, fonte de luz artificial do próprio equipamento) e concentração de CO2 de referência de 400 µmol mol^{-1}. As medições foram realizadas sempre no período da manhã (entre 8h e 11h), na segunda folha completamente expandida a partir do ápice, previamente padronizada em todas as plantas. Antes de leitura, o equipamento foi ajustado ("match"), e os dados foram registrados somente após estabilização dos valores, com coeficiente de variação total inferior a 5%. Foram obtidos os valores de fotossíntese líquida (A), condutância estomática (gs), transpiração (E) e déficit de pressão de vapor (VpdL); a eficiência do uso da água (WUE) foi calculada pela razão A/E. As medições foram realizadas nas plantas dos tratamentos Controle e Estresse Hídrico após o período de 15 dias de estresse.

Monitoramento da capacidade de campo

A umidade do substrato nos vasos em estresse hídrico foi acompanhada por meio de pesagens periódicas. No início do experimento, cada vaso foi irrigado até a saturação, permitindo-se a drenagem do excesso de água por 2-3horas; o peso registrado nesse ponto foi adotado como referência de 100% da capacidade de campo (cc). A partir de então, o percentual da capacidade de campo (%cc) foi calculado pela razão entre o peso do vaso naquele momento e o peso de referência na capacidade de campo, multiplicada por 100.

Análise dos dados

Os dados foram organizados e visualizados no software R, por meio de gráficos de caixa (boxplot) comparando os tratamentos Controle e Estresse Hídrico para cada clone. Os resultados apresentados têm caráter descritivo e exploratório, com base na distribuição dos dados observados.

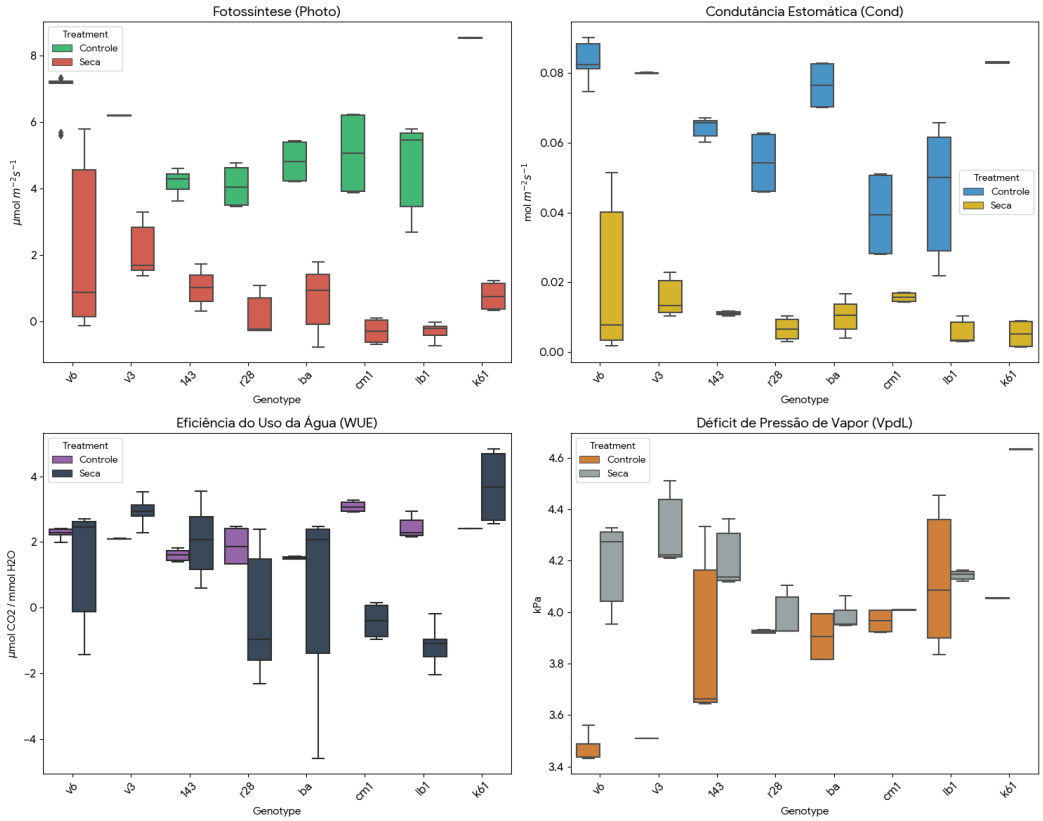
Resultados

A avaliação das trocas gasosas revelou respostas distintas entre os oito clones de *Coffea canephora* (Figura 1). Os clones V3 e V6 destacaram-se como os mais tolerantes, mantendo as maiores taxas fotossintéticas absolutas sob seca (2,12 e 2,18 µmol m^{-2} s^{-1}, respectivamente), mesmo após reduções de aproximadamente 65% e 68% em relação ao controle. O clone V3 apresentou aumento na eficiência do uso da água (WUE) durante o déficit hídrico (de 2,0 para 2,9 µmol CO2 $mmol^{-1}$ H2O). O clone 143 comportou-se de forma intermediária, preservando fotossíntese positiva.

Em contraste, o clone K61 apresentou o maior potencial fotossintético no controle (8,54 µmol m^{-2} s^{-1}), mas sofreu a queda acentuada sob seca (0,76 µmol m^{-2} s^{-1}), podendo indicar alta sensibilidade a condições hídricas. Os clones BA e R28 também exibiram reduções severas, com valores de fotossíntese próximos de zero sob estresse. Os clones CM1 e LB1 apresentaram o desempenho mais crítico, com fotossíntese líquida negativa sob seca (-0,29 e -0,30 µmol m^{-2} s^{-1}, respectivamente).

As medições de trocas gasosas sob estresse foram realizadas 15 dias após o início da suspensão total da irrigação, a capacidade de campo dos oitos clones estava em média de 28,0%. O clone LB1 apresentou o menor percentual médio de capacidade de campo (23,5% CC), seguido por V3 (25,6%), CM1 (27,6%), BA (27,9%), 143 e V6 (28,6% cada), R28 (29,9%) e K61, que registrou o maior valor médio (32,6% CC). Os clones LB1 e V3 estavam, portanto, entre os que atingiram os menores percentuais de umidade no substrato. Comparando os dados seu desempenho fisiológico dos dois clones que apresentaram respostas distintas o LB1 apresentou dados mais críticos, enquanto o V3 sob déficit hídrico manteve fotossíntese líquida positiva e aumento da eficiência do uso da água, reforçando sua caracterização como o clone com melhor desempenho a tolerante à seca entre os avaliados. Já K61 apresentou o maior percentual cc — ou seja, estava relativamente menos exposto ao déficit hídrico do que os demais no momento da medição — e ainda assim registrou a maior queda de fotossíntese líquida (de 8,54 para 0,76 µmol m^{-2} s^{-1}), indicando uma maior sensibilidade à seca.

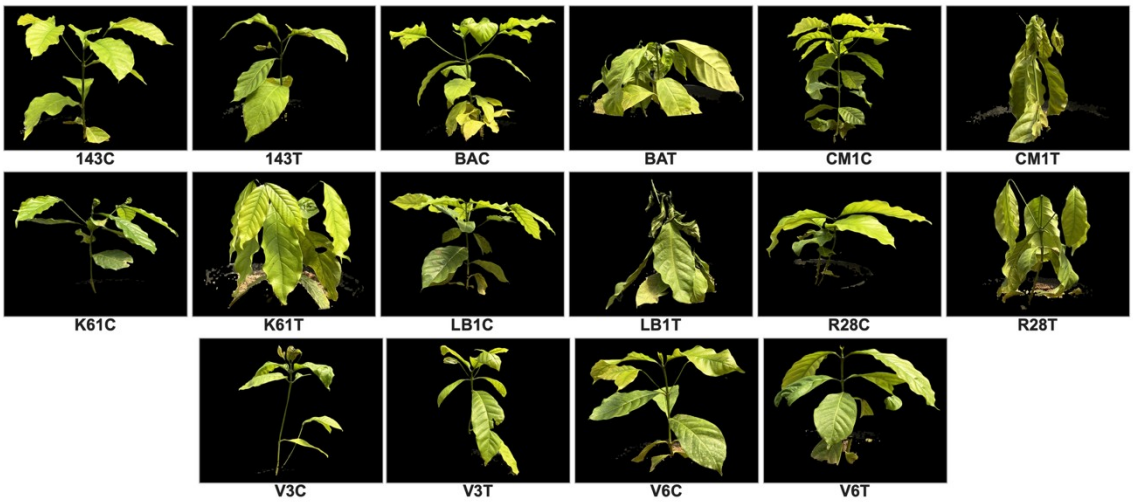
Figura 1 - Fotossíntese líquida, condutância estomática, eficiência do uso da água (WUE) e déficit de pressão de vapor (VpdL) de oito genótipos de café (V6, V3, 143, R28, BA, CM1, LB1, K61) em condições controle e sob estresse por seca.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A avaliação visual das mudas ao final do período de estresse hídrico corrobora os resultados fisiológicos obtidos por IRGA (Figura 2). Os genótipos V3 e V6, identificados como os mais tolerantes com base nas trocas gasosas, mantiveram folhagem predominantemente túrgida e verde mesmo sob déficit hídrico severo. Em contraste, os genótipos CM1 e LB1, que registraram fotossíntese líquida negativa sob seca, apresentaram sintomas visuais acentuados de murcha, com folhas secas, enroladas. O genótipo K61, apesar do maior potencial fotossintético no controle, também exibiu sinais visíveis de estresse sob seca, incluindo murcha e enrolamento foliar, consistente com a queda abrupta observada nas trocas gasosas.

Figura 2 - Aspecto visual das mudas dos oito genótipos de café (V3, V6, 143, R28, BA, CM1, LB1, K61) em condição Controle e sob Estresse Hídrico, ao final do período experimental.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Discussão

Os resultados evidenciam uma resposta fisiológica contrastante entre os clones de *C. canephora*. De modo geral, a limitação da fotossíntese sob estresse esteve associada à redução da condutância estomática, indicando que o fechamento estomático foi o principal mecanismo de resposta ao déficit hídrico, restringindo a difusão de CO_2 até os sítios de carboxilação e limitando a perda de água por transpiração (Pinheiro; Chaves, 2011; Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2016).

Os clones V3 e V6, além de manterem as maiores taxas fotossintéticas absolutas sob seca, destacaram-se pela manutenção da integridade fisiológica mesmo diante de reduções expressivas em relação ao controle. O aumento da eficiência do uso da água em V3 durante o déficit hídrico é indicativo de uma estratégia conservadora no uso de recursos, na qual a planta regula o fechamento estomático de forma a otimizar o ganho de carbono por unidade de água transpirada — mecanismo frequentemente associado a genótipos tolerantes à seca (Da Matta *et al.*, 2003). A manutenção da turgescência foliar observada visualmente nesses clones é compatível com respostas celulares mais eficientes de ajuste osmótico e proteção de membranas, mecanismos apontados como determinantes da tolerância ao déficit hídrico em plantas (De Melo *et al.*, 2022; He; He; Ding, 2018).

Por outro lado, o clone K61 apesar de ter apresentado o maior potencial fotossintético em no controle, foi o que sofreu a queda mais acentuada sob estresse, mesmo estando entre os que registraram maior percentual de CC, sugerindo que sua sensibilidade à seca não pode ser atribuída apenas à disponibilidade hídrica do substrato, mas a uma resposta fisiológica intrínseca do clone (Pinheiro; Chaves, 2011; Xu; Fu, 2022). Esse padrão reforça a importância da avaliação individualizada por material genético, corroborando que plantas altamente produtivas em condições ótimas nem sempre mantêm essa estabilidade sob estresse (Da Matta; Ramalho, 2006).

Já os clones CM1 e LB1 apresentaram fotossíntese líquida negativa sob déficit hídrico, indicando que a respiração mitocondrial e a fotorrespiração superaram a fixação líquida de carbono. Sendo consistente com o excesso de energia de excitação não dissipada pela via fotoquímica sob baixa

atividade fotossintética, que favorece a formação de espécies reativas de oxigênio (ROS) e compromete a integridade de membranas celulares (Lawlor; Tezara, 2009; Osakabe *et al.*, 2014; Flexas *et al.*, 2004).

Conclusão

Os resultados obtidos permitem concluir que há variação fisiológica entre os clones de *Coffea canephora* quanto à tolerância ao déficit hídrico. Os clones V3 e V6 destacaram-se como mais tolerantes à seca, mantendo maiores taxas fotossintéticas. V3 apresenta maior eficiência no uso da água sob estresse, enquanto CM1 e LB1 mostraram-se os mais sensíveis, com fotossíntese líquida negativa e sintomas visuais acentuados de murcha. O clone K61, apesar do elevado potencial fotossintético em condição controle, também demonstrou alta sensibilidade ao déficit hídrico. Esses resultados contribuem para a seleção de materiais promissores em programas de melhoramento genético voltados à obtenção de cultivares mais resilientes às condições adversas.

Referências

AL-GHAMEDI, K. *et al.* Assessment of Genetic Diversity of Local Coffee Populations in Southwestern Saudi Arabia Using SRAP Markers. **Agronomy**, v. 13, p. 302, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agronomy13020302. Acesso em: 02 set. 2026.

DAMATTA, F. M.; CHAVES, A. R. M.; PINHEIRO, H. A.; DUCATTI, C.; LOUREIRO, M. E. Drought tolerance of two field-grown clones of *Coffea canephora*. **Plant Science**, v. 164, n. 1, p. 111-117, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00342-4. Acesso em: 01 set. 2026.

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, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100006. Acesso em: 03 set. 2026.

DE MELO, B. P. *et al.* Abiotic Stresses in Plants and Their Markers: A Practice View of Plant Stress Responses and Programmed Cell Death Mechanisms. **Plants**, v. 11, n. 9, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/plants11091100. Acesso em: 04 set. 2026.

DEPOLO, R. P. *et al.* Expression of self-incompatibility in *Coffea canephora* genotypes grown in the western Amazon. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, e03031, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.03031. Acesso em: 02 set. 2026.

FLEXAS, J.; BOTA, J.; LORETO, F.; CORNIC, G.; SHARKEY, T. D. Diffusive and Metabolic Limitations to Photosynthesis under Drought and Salinity in C3 Plants. **Plant Biology**, v. 6, n. 3, p. 269-279, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1055/s-2004-820867. Acesso em: 01 set. 2026.

HE, M.; HE, C.-Q.; DING, N.-Z. Abiotic Stresses: General Defenses of Land Plants and Chances for Engineering Multistress Tolerance. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, dez. 2018. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01771. Acesso em: 03 set. 2026.

INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL (INCAPER). Café Conilon. Vitória: Incaper, 2023. Disponível em: https://incaper.es.gov.br/. Acesso em: 04 set. 2026.

KIWUKA, C. *et al.* Diversidade genética do café Robusta de Uganda nativo e cultivado (*Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner): influências climáticas, potencial de reprodução e conservação da diversidade. **PLoS ONE**, v. 16, n. 2, e0245965, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245965. Acesso em: 02 set. 2026.

LAWLOR, D. W.; TEZARA, W. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes. **Annals of**

Botany, v. 103, n. 4, p. 561-579, fev. 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1093/aob/mcn244. Acesso em: 01 set. 2026.

OSAKABE, Y. *et al.* Response of plants to water stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, mar. 2014. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00086. Acesso em: 03 set. 2026.

PINHEIRO, C.; CHAVES, M. M. Photosynthesis and drought: can we make metabolic connections from available data? **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 3, p. 869-882, jan. 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1093/jxb/erq340. Acesso em: 04 set. 2026.

PIRASTEH-ANOSHEH, H.; SAED-MOUCHESI, A.; PAKNIYAT, H.; PESSARAKLI, M. Stomatal responses to drought stress. **In Water Stress and Crop Plants, P. Ahmad (Ed.)**, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1002/9781119054450.ch3. Acesso em: 02 set. 2026.

SCALABRIN, S. *et al.* Um único evento de poliploidização na origem do genoma tetraplóide de *Coffea arabica* é responsável pela variação genética extremamente baixa no germoplasma selvagem e cultivado. **Scientific Reports**, v. 10, p. 4642, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41598-020-61216-7. Acesso em: 01 set. 2026.

USDA. United States Department of Agriculture. Production, Supply and Distribution, 2023. Disponível em: https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/topCountriesByCommodity. Acesso em: 02 set. 2026.

VENANCIO, L. P. *et al.* Impact of drought associated with high temperatures on *Coffea canephora* plantations: a case study in Espírito Santo State, Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, dez. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41598-020-76713-y. Acesso em: 03 set. 2026.

XU, Y.; FU, X. Reprogramming of Plant Central Metabolism in Response to Abiotic Stresses: A Metabolomics View. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 10, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ijms23105716. Acesso em: 04 set. 2026.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Brasil) — Código de Financiamento 001, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES, Vitória—ES, Brasil) junto ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq, Brasil), pelo apoio financeiro concedido a este estudo - 243/2025 - P: 2025-LG7W8.