TOLERÂNCIA À SECA EM *Coffea canephora*: MURCHA E ALOCAÇÃO DE BIOMASSA DIFERENCIAM CLONES COMERCIAIS

Vinicius Sartori Fioresi, Guilherme Cordenonsi da Fonseca, Diego Pereira do Couto, Aline dos Santos Bergamin, 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, diego_couto@hotmail.com, aline.bergamin@edu.ufes.br, adesioferreira@gmail.com, marcia.ferreira@ufes.br

Resumo

O déficit hídrico compromete o crescimento e a produtividade do cafeeiro conilon (*Coffea canephora*), sendo relevante identificar estratégias morfológicas associadas à tolerância à seca. Neste estudo, avaliaram-se sete clones comerciais (LB1, CM1, BA, 143, V3, V6 e R28) submetidos aos tratamentos Controle e Estresse Hídrico, por meio de escala visual de murcha, biomassa seca, razão raiz/parte aérea e imagens do sistema radicular. Os genótipos V3, V6 e 143 apresentaram maior tempo até a murcha leve (15 dias) e mantiveram razão raiz/parte aérea estável, associada a maior biomassa total sob estresse. R28 e BA formaram grupo intermediário (13 dias), enquanto CM1 e LB1 murcharam mais precocemente (11 dias). Em LB1, o aumento aparente na razão raiz/parte aérea refletiu perda de massa foliar, e não investimento radicular, enquanto CM1 manteve sistema radicular mais denso. Os resultados evidenciam diferentes estratégias morfológicas de resposta à seca entre os clones, reforçando o potencial da fenotipagem visual e da alocação de biomassa como ferramentas de triagem em programas de melhoramento genético.

Palavras-chave: Sistema radicular. Crescimento vegetal. Tolerância à seca. Melhoramento genético.

Área do Conhecimento: Ciências agrárias - Agronomia

Introdução

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).

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).

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).

Além das respostas fisiológicas, como o fechamento estomático, as plantas de café apresentam mecanismos morfológicos de resposta à seca, entre eles a alteração no padrão de crescimento e na alocação de biomassa entre raiz e parte aérea, que podem favorecer a manutenção da absorção de água em condições de baixa disponibilidade hídrica no solo (SALLIN et al., 2026). A avaliação visual de sintomas de murcha, aliada à quantificação da biomassa seca e da arquitetura radicular, constitui uma abordagem simples, de baixo custo, permitindo identificar diferenças nos clones na velocidade e na intensidade da resposta ao estresse hídrico, o presente estudo teve como objetivo avaliar a progressão dos sintomas visuais de murcha e a alocação de biomassa entre raiz e parte aérea em sete clones comerciais de *C. canephora* submetidos a estresse hídrico, 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 sete clones comerciais de *Coffea canephora:* LB1, CM1, BA (Barreirinha), 143, V3, V6 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.

Avaliação visual de sintomas de murcha

Os sintomas de estresse hídrico foram monitorados visualmente a cada 2-3 dias, por meio de uma escala de notas de 1 a 8, em que a nota 1 correspondeu à turgidez total (ausência de sintomas visíveis) e a nota 8, ao colapso e morte da planta. Considerou-se murcha leve a partir da nota 3, caracterizada por sintomas visíveis nas folhas mais jovens e nas brotações apicais. Para cada clone, foi registrado o número de dias necessários para que as plantas em estresse hídrico atingissem esse limiar.

Biomassa seca e alocação raiz/parte aérea

Ao final do período de estresse (15 dias), a parte aérea de cada planta foi cortada rente ao substrato e as raízes foram lavadas cuidadosamente para remoção completa do substrato aderido. O material foi separado em parte aérea e raiz, acondicionado em sacos de papel identificados e seco em estufa de circulação forçada a 65-70°C por 72 horas, até atingir peso constante. A massa húmida e seca de parte aérea e de raiz foi determinada em balança de precisão, sendo calculadas a razão raiz/parte aérea e a biomassa seca total (soma das massas secas de raiz e parte aérea) para cada planta.

Análise dos dados

Os dados foram organizados e visualizados no software R, por meio de gráficos de linha (evolução da nota de murcha), gráficos de barras (dias até a murcha leve) e gráficos de caixa (boxplot) para as variáveis de biomassa, comparando os tratamentos Controle e Estresse Hídrico para cada genótipo. Os resultados apresentados têm caráter descritivo e exploratório, com base na distribuição dos dados observados.

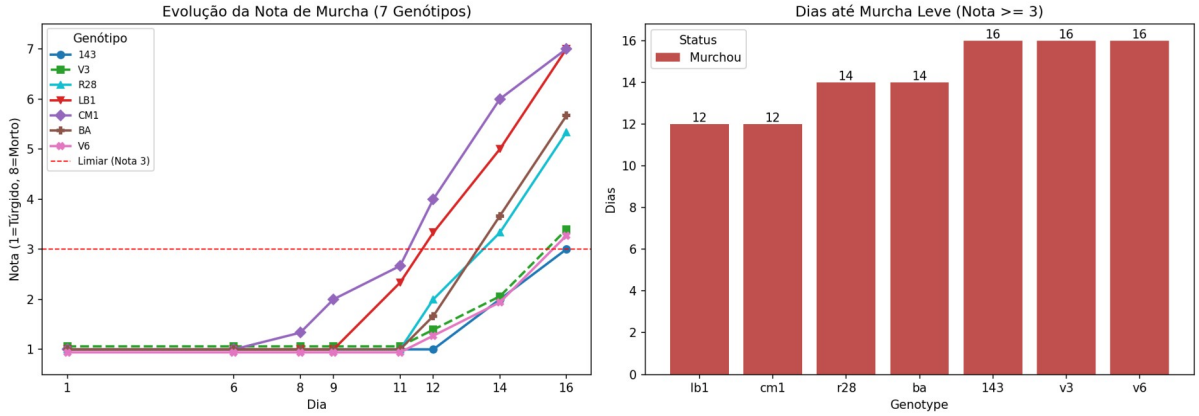
Resultados

A fenotipagem visual de murcha diferenciou claramente três grupos entre os sete genótipos avaliados quanto ao tempo necessário para atingir a nota 3 (murcha leve) (Figura 1). Os genótipos V3, V6 e 143 foram os mais tardios a apresentar sintomas, resistindo 15 dias até atingir esse limiar. Os clones R28 e BA formaram um grupo intermediário, com murcha leve observada aos 13 dias. Já os clones CM1 e LB1 atingiram a murcha leve mais precocemente, em apenas 11 dias.

A análise da alocação de biomassa (razão raiz/parte aérea e biomassa total) reforçou essas diferenças entre genótipos (Figura 2). O clone V3 manteve razão raiz/parte aérea alta e estável (~0,6-0,9) tanto no controle quanto na seca, associada à maior biomassa total sob déficit hídrico entre os genótipos avaliados (12,7 g). O clone V6 foi semelhante, equilibrado entre raiz e parte aérea.

Em contraste, LB1 apresentou a maior razão raiz/parte aérea sob seca (1,14), porém esse valor não refletiu maior investimento real em raiz: decorreu da perda acentuada de massa foliar (murcha), que elevou artificialmente a proporção raiz/parte aérea, ao mesmo tempo em que a biomassa total do genótipo caiu de forma acentuada. O resultado indica que, em LB1, houve interrupção do crescimento da planta como um todo.

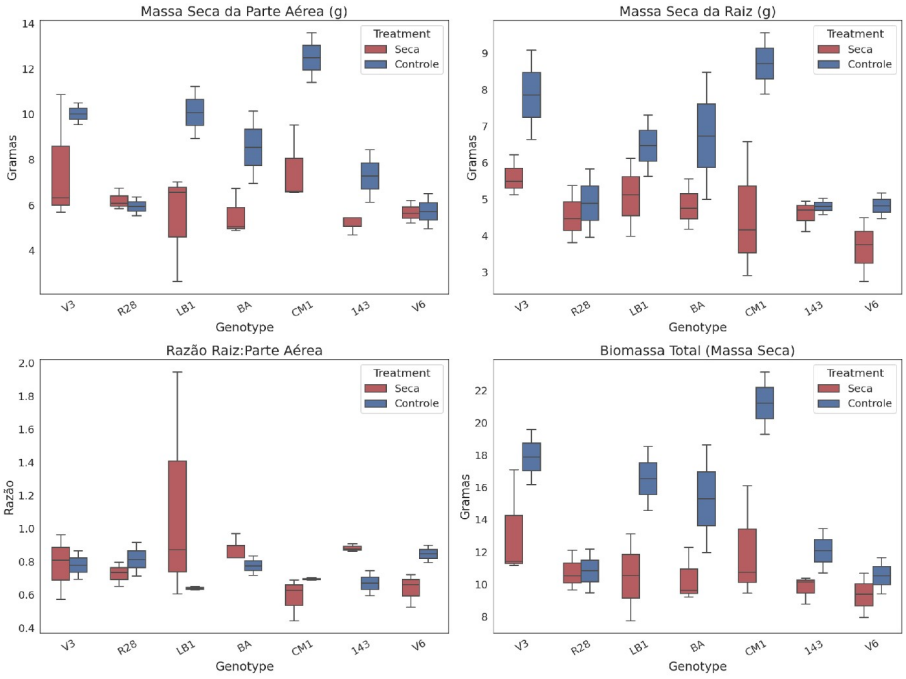
Figura 1 - Evolução da nota de murcha (1 = túrgido, 8 = morto) ao longo do período de estresse e número de dias até a murcha leve (nota ≥ 3) em sete genótipos de café.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

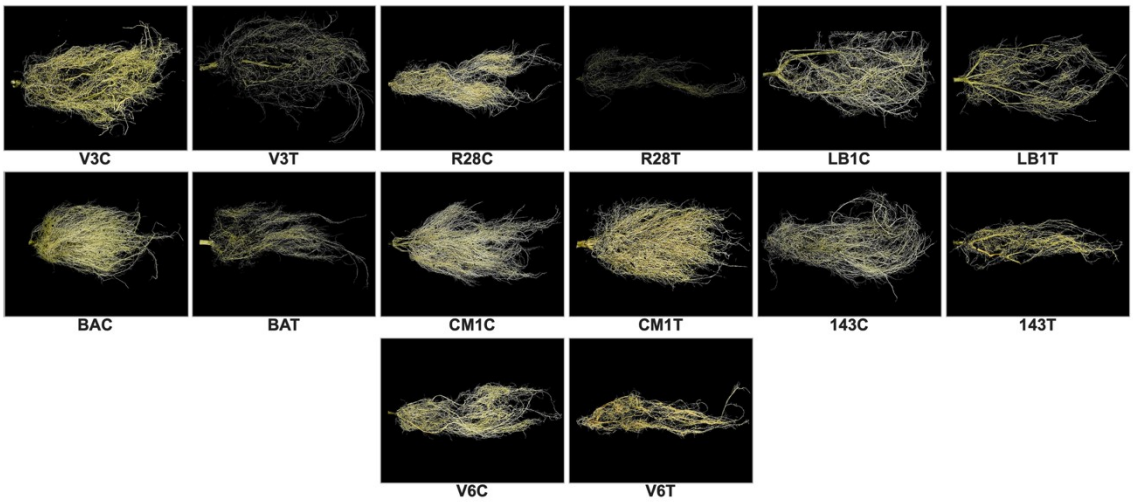
As imagens das raízes (Figura 3) permitiu observar diretamente a arquitetura radicular associada aos padrões de biomassa descritos. O clone CM1 exibiu sistema radicular visivelmente mais denso e volumoso tanto no controle quanto sob estresse, compatível com sua maior biomassa total absoluta mesmo sob déficit hídrico severo. Já LB1 apresentou redução perceptível na densidade e ramificação das raízes sob seca em relação ao controle, reforçando a interpretação de que o aumento na razão raiz/parte aérea desse genótipo decorreu da perda de massa foliar, e não de maior investimento radicular. Os demais (V3, V6, 143, R28 e BA) mantiveram sistemas radiculares finos e ramificados, sem alterações morfológicas marcantes entre tratamentos, condizentes com o padrão mais equilibrado de alocação de biomassa observado nesses materiais.

Figura 2 - Massa seca da parte aérea, massa seca da raiz, razão raiz/parte aérea e biomassa total de sete clones de café em condições controle e sob estresse por seca.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 3 - Fotos das raízes por clone em condições Controle e Estresse Hídrico.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Discussão

O déficit hídrico é um dos principais fatores que limitam o crescimento e a produção do cafeeiro (DAMATTA et al., 2007). Os resultados evidenciam um gradiente consistente de tolerância à seca entre os clones de *C. canephora* avaliados. Os grupos definidos pela fenotipagem visual de murcha coincidiram, em grande medida, com o padrão de alocação de biomassa observado. Os clones V3, V6 e 143, que levaram mais tempo para atingir a murcha leve, também mantiveram razão raiz/parte aérea estável e maior biomassa total sob estresse, sugerindo que o investimento equilibrado em sistema

radicular contribuiu para retardar o aparecimento de sintomas foliares de déficit hídrico, na qual a manutenção ou o maior desenvolvimento do sistema radicular sustenta a absorção de água por mais tempo, retardando a desidratação da parte aérea (AMAN et al., 2024).

Além da arquitetura do sistema radicular, o ajuste osmótico celular pode contribuir para esse fenótipo, mantendo as células túrgidas e funcionais por mais tempo mesmo com o potencial de água no solo menor (CHAVES; MAROCO; PEREIRA, 2003). Esse ajuste está associado a respostas celulares mais amplas de tolerância ao déficit hídrico, como o remodelamento da membrana e o acúmulo de osmólitos compatíveis com a demanda celular, mecanismos apontados como parte do conjunto de defesas conservadas em plantas sob estresse abiótico (DE MELO et al., 2022; HE; HE; DING, 2018).

Os clones CM1 e LB1, que atingiram a murcha leve mais precocemente. O aumento da razão raiz/parte aérea observado em LB1 não refletiu maior investimento radicular, mas sim a perda acentuada de massa foliar decorrente da murcha, associada a uma redução visível na densidade e ramificação das raízes sob estresse, evidenciando um comprometimento simultâneo da parte aérea e do sistema radicular. Em contraste, CM1 manteve sistema radicular denso e volumoso mesmo sob déficit hídrico severo, indicando que a sensibilidade foliar precoce desse genótipo não foi acompanhada por colapso radicular equivalente.

Essa dissociação entre as respostas da parte aérea e da raiz reforça a importância de associar diferentes níveis de avaliação morfológica — escala visual de murcha, biomassa seca e imagens do sistema radicular — para uma caracterização mais completa da tolerância à seca em café, evitando interpretações equivocadas baseadas isoladamente em índices como a razão raiz/parte aérea. O desenvolvimento de raízes em resposta ao estresse hídrico altera a alocação de carbono, e o crescimento excessivo de raízes também aumenta os custos metabólicos da planta, gerando competição com a parte aérea e reduzindo o crescimento global (BORAH; BORUA; SAIKIA, 2021). Isso indica que os genótipos mais tolerantes conseguem manter um equilíbrio metabólico, realizando o crescimento da raiz sem comprometer a integridade da planta.

Do ponto de vista aplicado, esses resultados são particularmente relevantes para o Espírito Santo, responsável por cerca de 70% da produção nacional de *C. canephora* (VENANCIO et al., 2020; INCAPER, 2023). A identificação de genótipos com estratégias morfológicas mais eficientes de resposta à seca, como V3, V6 e 143, contribui diretamente para os programas de melhoramento genético voltados à obtenção de cultivares mais resilientes, reforçando o valor da fenotipagem visual e da análise de biomassa como ferramentas acessíveis de triagem em larga escala.

Conclusão

Os resultados permitem concluir que há variabilidade morfológica entre os genótipos de *Coffea canephora* quanto à resposta ao déficit hídrico. Os clones V3, V6 e 143 destacaram-se como os mais tolerantes, com maior tempo até a murcha leve e alocação de biomassa mais equilibrada e estável entre raiz e parte aérea sob estresse. CM1 e LB1 mostraram-se os mais sensíveis quanto à velocidade de instalação dos sintomas visuais, ainda que com estratégias distintas: LB1 apresentou comprometimento conjunto de raiz e parte aérea, enquanto CM1 manteve sistema radicular robusto apesar da murcha precoce. Esses resultados reforçam o potencial da fenotipagem visual de murcha, associada à análise de biomassa e à imagem radicular, como ferramenta eficaz, acessível e de baixo custo para a triagem de genótipos de café quanto à tolerância à seca em programas de melhoramento genético.

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.

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. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 7, n. 2, e20488, 2024.

BORAH, N.; BORUA, P. K.; SAIKIA, S. P. Effect of water stress on morphological, physiological, biochemical and molecular responses of plants: A Review. **Ecology, Environment and Conservation**, v. 27, n. May Suppl. Issue, p. S59-S72, 2021.

CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S. Understanding plant responses to drought — from genes to the whole plant. **Functional Plant Biology**, v. 30, n. 3, p. 239-264, 2003.
DAMATTA, F. M.; RONCHI, C. P.; MAESTRI, M.; BARROS, R. S. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 4, 2007.
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.
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.
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.
INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL (INCAPER). Cafeicultura - Café Conilon. [REFERÊNCIA INCOMPLETA - completar título exato, tipo de publicação e data de acesso]. 2023.
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:
SALLIN, V. P.; FALQUETO, A. R.; LIRA, J. M. S.; SCHMILDT, E. R.; ARANTES, L. O. Rooting response in contrasting genotypes of *Coffea canephora* using IBA. **Revista Ciência Agronômica**, v. 57, p. e202492846, 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.
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: 20 out. 2023.
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.

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.