

PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS E COMPOSTOS FENÓLICOS EM GENÓTIPOS DE CAFÉ

Francisco Remigio Cano-Macías, João Paulo de Moraes Oliveira, Jessika Santos de Oliveira, Samantha Zorzi Sousa Resende, Sônia Maria da Silva, Elias Terra Werner, Milene Miranda Praça Fontes.

Universidade Federal do Espírito Santo, Alto Universitário, S/N, Guararema, 29500-000 - Alegre - ES, Brasil, Frannk_88@hotmail.com, joaopaulo.ueg@gmail.com, jessikaoliveira664@gmail.com, samantha.resende59@gmail.com, soniamsquimica@gmail.com, elias.werner@ufes.br, mileneufes@gmail.com.

Resumo

O acúmulo de pigmentos fotossintéticos e compostos fenólicos em genótipos de *Coffea* reflete diferenças genéticas que influenciam a fisiologia e a qualidade bioquímica das plantas. Este estudo avaliou os teores desses metabólitos em mudas de Arábica, Conilon e Robusta adquiridas de viveiros comerciais. Amostras foliares liofilizadas foram extraídas com etanol para quantificação de pigmentos fotossintéticos e compostos fenólicos. O experimento seguiu delineamento inteiramente casualizado, com três indivíduos por genótipo e três repetições, e os dados foram analisados por análise de variância, com comparação das médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os genótipos diferiram para clorofila *a* e compostos fenólicos, enquanto clorofila *b* e carotenoides permaneceram estáveis. Robusta apresentou os maiores teores de clorofila *a* e compostos fenólicos, seguida por Conilon e Arábica, evidenciando a influência genética sobre esses metabólitos.

Palavras-chave: Caracterização Genotípica. Carotenoides. *Coffea*. Clorofilas. Melhoramento Genético.

Área do Conhecimento: Ciências Agrárias / Agronomia.

Introdução

O cultivo de café é uma atividade de extrema importância para a economia brasileira, gerando milhões de empregos diretos e indiretos e representando uma fonte crucial de divisas para o país. Como maior produtor e exportador mundial, o Brasil tem sua produção sustentada principalmente pelas espécies *Coffea arabica* e *Coffea canephora* (Bullergahn *et al.*, 2024). Estas espécies apresentam diferenças genéticas, agrônômicas e bioquímicas que repercutem diretamente em sua adaptação ambiental, produtividade e qualidade final do produto, motivando contínuas investigações científicas (Mondego *et al.*, 2011).

Os pigmentos fotossintéticos, como as clorofilas e os carotenoides, são moléculas fundamentais para a captação e conversão da energia luminosa em energia química, sustentando o crescimento e o desenvolvimento das plantas. Além dessa função primária, os carotenoides desempenham um papel antioxidante vital, protegendo o aparato fotossintético contra o foto-dano e a foto-inibição causados por excesso de luz (Simkin *et al.*, 2022). Estudos em outras espécies, como *Inula helenium* L., demonstram uma notável variação na composição desses pigmentos entre diferentes populações, refletindo sua capacidade de adaptação a ambientes diversos e permitindo a identificação de genótipos com maior vigor e concentração de metabólitos de interesse (Moradi *et al.*, 2025).

Paralelamente, os compostos fenólicos, pertencentes à classe dos metabólitos secundários, desempenham papel essencial na defesa das plantas contra estresses bióticos e abióticos, favorecendo a adaptação tanto ao ambiente natural quando às condições de cultivo. Dessa

forma, esses compostos contribuem não apenas para a sobrevivência em ecossistemas diversos, mas também para a estabilidade e a produtividade em sistemas agrícolas (Ahlawat *et al.*, 2024). Em espécies de café, genótipos silvestres frequentemente apresentam maior abundância de flavonoides em comparação com variedades comerciais, representando um recurso valioso para programas de fitomelhoramento, ao permitir a reintrodução de alelo de defesa perdidos ou reduzidos durante a domesticação (Castro-Moretti *et al.*, 2022).

Portanto, considerando a influência da variabilidade genética sobre a composição bioquímica das plantas e suas implicações fisiológicas e adaptativas, o presente estudo teve como objetivo quantificar e comparar os teores de pigmentos fotossintéticos (clorofila *a*, clorofila *b* e carotenoides) e de compostos fenólicos totais em mudas de Arábica, Conilon e Robusta. Com isso, essa análise visa evidenciar as diferenças bioquímicas específicas de cada grupo, permitindo uma caracterização mais precisa de sua fisiologia e potencial adaptativo, fornecendo informações úteis para programas de melhoramento genético.

Metodologia

Mudas comerciais de *C. arabica* (var. Arábica 185/10 Vermelho), provenientes de propagação seminal, e de *C. canephora* (var. Conilon, clone A₁, e var. Robusta, clone R₈), obtidas por estaquia, foram adquiridas de pequenos viveiros localizados na zona rural dos municípios de Ibitirama – ES (Arábica) e Castelo – ES (Conilon e Robusta). As mudas apresentavam aproximadamente 15 cm de altura e, no mínimo, três pares de folhas expandidas. Foram cultivadas em sacos plásticos contendo substrato de terra natural, sem adição de componentes comerciais, dispostos diretamente sobre o solo e cobertos com sombrite de 50%, sendo adquiridas para avaliação e comparação de seus aspectos bioquímicos.

Para a determinação bioquímica foi realizada a quantificação dos pigmentos fotossintéticos (clorofila *a*, clorofila *b* e carotenoides) e dos compostos fenólicos em amostras foliares de todos os genótipos. Para isso, 10 mg de tecido foliar previamente liofilizado (Liofilizador K108, Liotop®) e macerado (MagNA Lyser, ROCHE®) foram submetidos à extração sequencial com etanol nas concentrações de 98%, 80% e 50%. Os sobrenadantes obtidos foram coletados e armazenados sob refrigeração até as análises. A quantificação dos pigmentos fotossintéticos foi realizada a partir dos extratos, mantendo-os protegidos da luz, utilizando um espectrofotômetro Thermo Scientific Multiskan® GO. As leituras foram realizadas nos comprimentos de onda de 470, 649 e 660 nm, conforme os procedimentos descritos por Lichtenthaler (1987) e Wellburn (1994). A análise dos compostos fenólicos totais seguiu o protocolo de Waterhouse (2002), baseado na reação com o reagente de Folin-Ciocalteu (10% v/v) e solução de carbonato de cálcio (4% m/v). As leituras foram realizadas no comprimento de onda de 760 nm, utilizando o mesmo equipamento espectrofotométrico.

A análise estatística foi conduzida em delineamento inteiramente casualizado, com três indivíduos por genótipo, sendo cada indivíduo considerado uma repetição, totalizando três repetições por tratamento. Antes da análise, verificou-se a normalidade, a distribuição e a homogeneidade de variâncias dos dados. Diferenças entre genótipos foram avaliadas por análise de variância e, quando significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$). Todas as análises estatísticas foram realizadas no *software R* (versão 4.4.1; R Core Team, R Foundation for Statistical Computing, Viena, Áustria).

Resultados

A análise de variância evidenciou efeito significativo dos genótipos apenas para os teores de clorofila *a* e compostos fenólicos (Tabela 1). Para clorofila *a*, foi observada diferença estatística entre os genótipos ($F = 6,45$; $p = 0,032$), demonstrando que a variabilidade genética exerce influência sobre a concentração desse pigmento fotossintético. Em contrapartida, não foram

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

detectadas diferenças significativas para clorofila *b* e carotenoides ($p > 0,05$), sugerindo maior estabilidade desses pigmentos entre as espécies de *C. arabica* e *C. canephora*.

O efeito mais expressivo ocorreu para os compostos fenólicos, com diferenças altamente significativas entre os genótipos ($p < 0,001$). Esses resultados apontam para uma forte influência genética sobre a síntese e acúmulo de metabólitos secundários, com destaque para a espécie Robusta, que apresentou os maiores teores em comparação a Arábica e Conilon.

Tabela 1 – Análise de variância para os teores de clorofila *a*, clorofila *b*, carotenoides e compostos fenólicos em diferentes genótipos de *Coffea*.

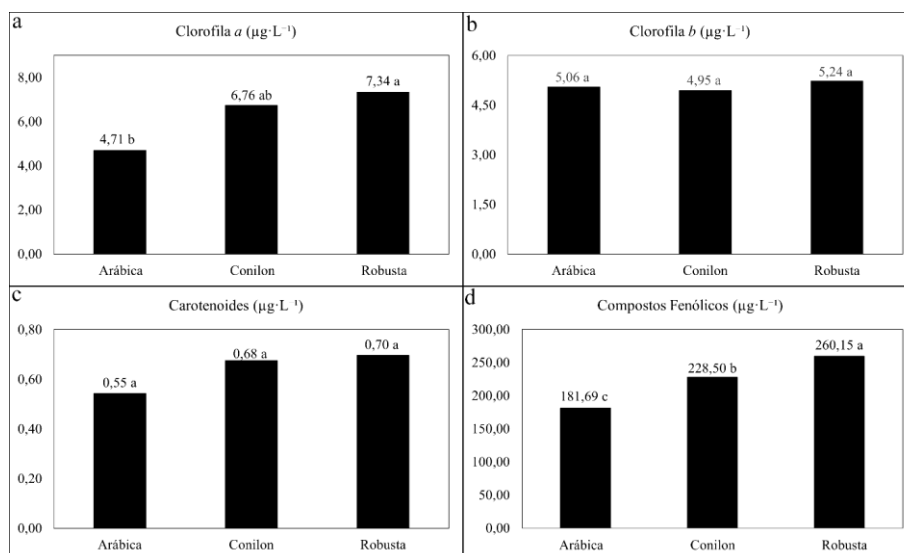
Variável	Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	Pr > F
Clorofila <i>a</i>	Genótipo	2	11,446	5,723	6,447	0,032 *
	Resíduo	6	5,326	0,888		
Clorofila <i>b</i>	Genótipo	2	0,126	0,063	0,111	0,897
	Resíduo	6	3,406	0,568		
Carotenoides	Espécie	2	0,041	0,020	3,031	0,123
	Genótipo	6	0,041	0,007		
Compostos Fenólicos	Espécie	2	9348	4674	51,15	0,00017 ***
	Resíduo	6	548	91		

GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; F = valor do teste F; Pr > F = probabilidade associada ao teste F. Significância: $p < 0,001$ (***); $p < 0,01$ (**); $p < 0,05$ (*). Fonte: elaborado pelo próprio autor (2025).

Na comparação das médias (Figura 1), o teor de clorofila *a* foi significativamente maior em Robusta ($7,34 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), seguido por Conilon ($6,76 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), que não diferiu de Arábica ($4,71 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) (Fig. 1a). Para clorofila *b*, os valores variaram entre $4,95$ e $5,24 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, sem diferenças estatísticas entre os genótipos (Fig. 1b). Da mesma forma, os teores de carotenoides foram semelhantes, variando de $0,55$ a $0,70 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (Fig. 1c). Em contraste, os compostos fenólicos variaram significativamente entre os genótipos, com maiores teores em Robusta ($260,15 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), seguidos por Conilon ($228,50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) e Arábica ($181,69 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), todos diferindo estatisticamente entre si (Fig. 1d).

Figura 1 – Teores médios de clorofila *a* (a), clorofila *b* (b), carotenoides (c) e compostos fenólicos (d) em folhas de cafeeiros dos genótipos Arábica, Conilon e Robusta. Barras seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO



Fonte: elaborado pelo próprio autor (2025).

Discussão

A menor concentração de clorofila *a* em Arábica (4,71 µg·L⁻¹) em condições ótimas de cultivo, em comparação com Robusta (7,34 µg·L⁻¹) e Conilon (6,76 µg·L⁻¹), indica uma limitação intrínseca em sua capacidade fotossintética. Esse padrão é consistente com Cintra *et al.* (2020), que observaram em *C. arabica* var. Tupi maior vulnerabilidade do aparelho fotossintético sob estresse hídrico (25-50% de água disponível), refletida na redução da eficiência fotoquímica (Fv/Fm) e na capacidade de captura de energia lumínica. Esses achados reforçam o papel da clorofila *a* como um indicador precoce da suscetibilidade fisiológica de Arábica e têm implicações diretas para programas de melhoramento genético voltados à resiliência climática.

A marcada disparidade genética na capacidade de síntese de metabólitos secundários entre espécies de café, evidenciada pelo conteúdo fenólico total significativamente maior nos genótipos de *C. canephora* (Robusta: 260,15 µg·L⁻¹; Conilon: 228,50 µg·L⁻¹) em comparação com *C. arabica* (181,69 µg·L⁻¹), confirma de forma sólida a hipótese proposta por Duangsodsri (2020) de que "os genótipos de *C. canephora* possuem um sistema de defesa constitutivo mais ativo, possivelmente como adaptação a ambientes mais estressantes". Essa superioridade na acumulação de compostos fenólicos representa uma adaptação evolutiva em que essas espécies diploides (2n = 2x = 22), originárias de altitudes mais baixas e de ambientes mais quentes e ensolarados da África Central e Ocidental, desenvolveram uma maior capacidade constitutiva para produzir antioxidantes como mecanismo primário de defesa contra o estresse abiótico, particularmente contra o estresse oxidativo gerado por altas temperaturas e intensidade luminosa.

Conclusão

A variabilidade genética entre os genótipos de *C. arabica* e *C. canephora* influencia de forma diferenciada a composição bioquímica das folhas, afetando principalmente os teores de clorofila *a* e compostos fenólicos, enquanto clorofila *b* e carotenoides permanecem relativamente estáveis. O elevado conteúdo de compostos fenólicos observado em Robusta sugere maior capacidade de síntese e acúmulo de metabólitos secundários, refletindo adaptações fisiológicas que podem conferir maior resistência a estresses ambientais. Esses resultados evidenciam diferenças bioquímicas significativas entre os genótipos de café, oferecendo subsídios para uma

compreensão mais detalhada de sua fisiologia e potencial adaptativo, além de fornecer informações relevantes para a caracterização e avaliação de genótipos em programas de melhoramento genético.

Referências

AHLAWAT, Y.; SINGH, M.; MANORAMA, K.; LAKRA, N.; ZAID, A.; ZULFIQAR, F. Plant phenolics: neglected secondary metabolites in plant stress tolerance. **Brazilian Journal of Botany**, v. 47, p. 703–721, 2024. DOI: [10.1007/s40415-023-00949-x](https://doi.org/10.1007/s40415-023-00949-x).

BULLERGAHN, V.; MENEZES, K.; VELOSO, T.; LUZ, J.; CASTANHEIRA, L.; PEREIRA, L.; SILVA, M. Diversity of potential nitrogen-fixing bacteria from rhizosphere of the *Coffea arabica* L. and *Coffea canephora* L. **3 Biotech**, v. 14, p. 1–27, 2024. DOI: [10.1007/s13205-023-03875-7](https://doi.org/10.1007/s13205-023-03875-7).

CASTRO-MORETTI, F.; COCUNON, J.; CASTILLO-GONZALEZ, H.; ESCUDERO-LEYVA, E.; CHAVERRI, P.; GUERREIRO-FILHO, O.; SLOT, J.; ALONSO, A. A metabolomic platform to identify and quantify polyphenols in coffee and related species using liquid chromatography mass spectrometry. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1057645, 2022. DOI: [10.3389/fpls.2022.1057645](https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1057645).

CINTRA, P.; MELO, O.; MENEZES, J.; PADILHA, R.; REZENDE, A.; MATOS, E. Analysis of chlorophyll a fluorescence in coffee seedlings under water stress. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, p. 28006–28014, 2020. DOI: [10.34117/bjdv6n5-301](https://doi.org/10.34117/bjdv6n5-301).

DUANGSODSRI, T. **Phenolic compounds in the response of *Coffea arabica* L. to abiotic stresses**. 2020. 215p. Doctoral Thesis (Plant Biology and Biochemistry) - Université Montpellier, Montpellier, France.

LICHTENTHALER, H. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **In Methods in enzymology**, v. 148, p. 350–382, 1987. DOI: [10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1).

MONDEGO, J.; VIDAL, R.; CARAZZOLLE, M.; TOKUDA, E.; PARIZZI, L.; COSTA, G.; PEREIRA, L.; ANDRADE, A.; COLOMBO, C.; VIEIRA, L.; PEREIRA, G.; BRAZILIAN COFFEE GENOME PROJECT CONSORTIUM. An EST-based analysis identifies new genes and reveals distinctive gene expression features of *Coffea arabica* and *Coffea canephora*. **BMC Plant Biology**, v. 11, p. 30, 2011. DOI: [10.1186/1471-2229-11-30](https://doi.org/10.1186/1471-2229-11-30).

MORADI, N.; NAGHDI BADI, H.; KALATEH JARI, S.; MEHRAFIN, A.; DANAEE, E. Diversity in photosynthetic pigments and phytochemical compounds among Iranian populations of *Inula helenium* L. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 72, p. 751–765, 2025. DOI: [10.1007/s10722-024-01955-y](https://doi.org/10.1007/s10722-024-01955-y).

SIMKIN, A.; KAPOOR, L.; DOSS, C.; HOFMANN, T.; LAWSON, T.; RAMAMOORTHY, S. The role of photosynthesis related pigments in light harvesting, photoprotection and enhancement of photosynthetic yield in planta. **Photosynthesis Research**, v. 152, p. 23–42, 2022. DOI: [10.1007/s11120-021-00892-6](https://doi.org/10.1007/s11120-021-00892-6).

WATERHOUSE, A. Wine phenolics. **Ann. N. Y. Acad. Sci.**, 957, 2002. DOI: [10.1111/j.1749-6632.2002.tb02903.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2002.tb02903.x).

WELLBURN, A. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of plant physiology**, v. 144, n. 3, p. 307-313, 1994. DOI: 10.1016/S0176-1617(11)81192-2.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), ao Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento da UFES/Alegre e ao Laboratório de Citogenética e Cultura de Tecidos Vegetais da UFES/Alegre pelo apoio financeiro, infraestrutura e recursos fornecidos para a realização deste estudo.