

RESPOSTAS FOTOSSINTÉTICAS DE GENÓTIPOS CONTRASTANTES DE *COFFEA CANEPHORA* À VARIAÇÃO ENTRE PERÍODOS SECO E CHUVOSO

Gabriel Permanhane da Silva¹, Leticia Rigo Tavares², Danilo Rodrigues Amaral², Gabriella Silva de Aguiar², Gustavo Miranda Cremonini², Taís Cristina Bastos Soares².

¹Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, Av. Alberto Lamego, 2000 - Parque California - 28013-602 - Campos dos Goytacazes - RJ, Brasil, permanhaneg@gmail.com.

²Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Alto Universitário, S/N – Guararema - 29500-000-Alegre-ES, Brasil, leticiarigot@hotmail.com, danilorodriguesamaralipanema@hotmail.com, gabriella.aguiar23@gmail.com, gustavom.cremonini@gmail.com, tais.soares@ufes.br.

Resumo

O café conilon (*Coffea canephora*) apresenta elevada sensibilidade ao déficit hídrico, o que representa um desafio crescente frente às mudanças climáticas. A identificação de genótipos mais tolerantes à seca é fundamental para o avanço de programas de melhoramento, e variáveis fisiológicas relacionadas à fotossíntese constituem ferramentas importantes nesse processo. Este estudo avaliou a taxa fotossintética (A), a condutância estomática (g_s) e a concentração interna de CO_2 (C_i) em 14 genótipos de *C. canephora* contrastantes para tolerância à seca, em condições de campo, durante os períodos chuvoso e seco. Os resultados indicaram maiores valores de A e g_s no período chuvoso, enquanto C_i manteve-se estável entre genótipos e períodos. A forte associação entre A e g_s sugere que a limitação da fotossíntese ocorreu principalmente por fatores estomáticos, sem alterações expressivas na concentração interna de CO_2 . Apesar da ausência de contrastes promissores entre os genótipos, os resultados destacam a relevância da condutância estomática como variável-chave para monitorar a resposta fisiológica de cafeeiros em campo.

Palavras-chave: Café conilon. Estresse Hídrico. Trocas gasosas.

Área do Conhecimento: Ciências biológicas (Botânica).

Introdução

O cafeeiro conilon (*C. canephora*) é uma cultura de grande relevância econômica em regiões tropicais, mas sua produtividade é fortemente afetada pela disponibilidade hídrica. Com a intensificação de períodos secos devido às mudanças climáticas, torna-se urgente identificar genótipos mais tolerantes, capazes de manter rendimento e qualidade sob déficit hídrico. O conhecimento sobre mecanismos fisiológicos como regulação estomática, manutenção da fotossíntese e eficiência no uso da água é essencial para compreender como diferentes genótipos enfrentam o estresse hídrico (Pinheiro *et al.*, 2005; Praxedes *et al.*, 2006; Avila *et al.*, 2020).

Variáveis fisiológicas como Taxa Fotossintética (A), Condutância Estomática (g_s) e Concentração Interna de CO_2 (C_i) são indicadores confiáveis para diferenciar genótipos quanto à tolerância à seca, fornecendo parâmetros mensuráveis do desempenho da planta em campo (DaMatta, 2004; Sarzynski *et al.*, 2024). Com base nisso, o presente estudo teve como objetivos comparar a resposta fisiológica de genótipos contrastantes de *C. canephora* nos períodos seco e chuvoso, identificar variáveis indicativas de tolerância à seca e fornecer subsídios para a seleção de materiais promissores em programas de melhoramento genético.

Metodologia

O experimento foi conduzido em condições de campo na Fazenda Experimental Bananal do Norte – Pacotuba, Cachoeiro de Itapemirim - ES, em clima tropical chuvoso e estação seca no outono-inverno (Aw; ICMBio, 2011). Utilizou-se Delineamento em Blocos Casualizados (DBC) com 14 genótipos de *C.*

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

canephora (dois parentais contrastantes para tolerância à seca — 120T e 109S — e 12 progênes de cruzamentos recíprocos), com três repetições de três plantas cada e espaçamento de 3×1 m. As 12 progênes consistiram em 6 pré-selecionadas da população 120x109 (3 tolerantes — 3T, 6T e 7T e 3 susceptíveis — 4S, 2S, 10S); e 6 pré-selecionadas da população 109x120 (3 tolerantes — 1T, 6aT e 50T; e 3 susceptíveis 42S, 44S e 59S (Sobreira, 2017).

As avaliações fisiológicas ocorreram em dois períodos de 2023, os quais foram considerados como os Tratamentos, neste experimento: após o período chuvoso (março) e no início do período seco (junho), correspondendo às fases de vegetação/formação de gemas florais e indução/maturação das gemas florais, respectivamente. Foram analisadas Taxa Fotossintética (A), Condutância Estomática (gs) e Concentração Interna de CO_2 (Ci), medidas com aparelho *Infrared Gas Analyser* (IRGA) em folhas maduras, completamente expandidas, de ramos plagiotrópicos na parte mediana da copa, entre 8h e 11h.

Os dados foram submetidos à ANOVA fatorial dupla (DBC) pelo pacote ExpDes.pt, com comparação de médias pelo teste de Tukey ($\alpha = 5\%$), além de análise de correlação entre variáveis visualizada com corplot e ggplot2 em ambiente R.

Resultados

A análise de variância (ANOVA) revelou que a taxa de fotossíntese (A) não foi significativamente influenciada pelos genótipos avaliados ($p = 0,623$) nem pela interação genótipos $\times$ tratamentos ($p = 0,476$), sendo a diferença significativa detectada apenas entre os tratamentos ($p < 0,001$) (Tabela 1). Observou-se que A foi significativamente maior no período chuvoso em comparação com o período seco (Tabela 4), evidenciando que a disponibilidade hídrica exerce papel predominante na regulação desse processo. De maneira similar, a condutância estomática (gs) apresentou efeito significativo apenas dos tratamentos ($p = 0,0018$), apresentando valores superiores no período chuvoso (Tabelas 2 e 4), o que corrobora a influência da umidade do solo na abertura estomática e nas trocas gasosas. Por outro lado, a concentração interna de CO_2 (Ci) não sofreu efeitos significativos dos genótipos ($p=0,6938$), tratamentos (0,3923) e nem da interação (0,9694) (Tabela 3), indicando que as variações observadas em A e gs não se refletiram na Ci, possivelmente devido a mecanismos compensatórios de assimilação de carbono.

Tabela 1 - Análise de Variância para a Taxa de Fotossíntese (A) em *C. canephora*.

Fonte de Variação	GL	SQ	Fc	p
Blocos	2	12.57	1.842	0.16832
Tratamentos	1	155.77	45.646	0.00000*
Genótipos	13	37.01	0.834	0.62320
Tratamentos x Genótipos	13	43.80	0.987	0.47587
Resíduo	54	184.28		
Total	83	433.44		

GL = Graus de Liberdade, SQ = Soma de Quadrados, Fc = F calculado, p = valor estatístico de p.

(*) Estatisticamente significativo ($\alpha = 5\%$)

Fonte: Os autores (2025).

Tabela 2 - Análise de Variância para a Condutância Estomática (gs) em *C. canephora*.

Fonte de Variação	GL	SQ	Fc	p
Blocos	2	0.009	0.8731	0.42348
Tratamentos	1	0.060	10.8145	0.00178*
Genótipos	13	0.054	0.7493	0.70728
Tratamentos x Genótipos	13	0.062	0.8592	0.59835
Resíduo	54	0.300		
Total	83	0.487		

GL = Graus de Liberdade, SQ = Soma de Quadrados, Fc = F calculado, p = valor estatístico de p.

(*) Estatisticamente significativo ($\alpha = 5\%$)

Fonte: Os autores (2025).

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Tabela 3 - Análise de Variância para a Concentração Interna de CO₂ (Ci) em *C. canephora*.

Fonte de variação	GL	SQ	Fc	p
Bloco	2	5.422	0.25984	0.77213
Tratamentos	1	7.755	0.74339	0.39239
Genótipos	13	103.480	0.76301	0.69383
Tratamentos x Genótipos	13	52.022	0.38358	0.96948
Resíduo	54	563.346		
Total	83	732.025		

GL = Graus de Liberdade, SQ = Soma de Quadrados, Fc = F calculado, p = valor estatístico de p.

(*) Estatisticamente significativo ($\alpha = 5\%$)

Fonte: Os autores (2025).

Tabela 4 - Médias de taxa de fotossíntese (A), condutância estomática (gs) e concentração interna de CO₂ (Ci) em *C. canephora* durante os períodos chuvoso e seco

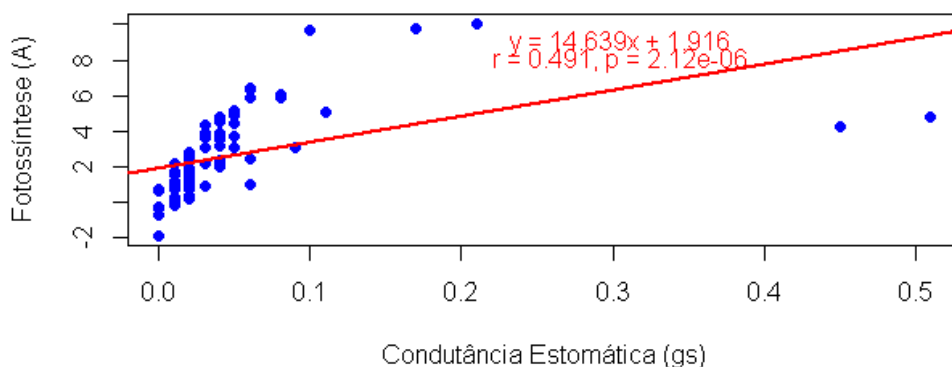
Período	A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	gs ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Ci ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$)
Chuvoso	3,93a	0,071a	243,60
Seco	1,20b	0,018b	262,81

Médias seguidas por letras diferentes na coluna diferem significativamente pelo teste de Tukey ($\alpha = 5\%$).

Fonte: Os autores (2025).

A análise de correlação revelou associação positiva e moderada entre A e gs ($r = 0,491$; $p < 0,01$), indicando que a condutância estomática está diretamente vinculada à capacidade fotossintética (Figura 1). Por outro lado, a correlação entre A e Ci foi baixa e negativa ($r = -0,256$; $p = 0,019$) (Figura 2), e não se observou relação significativa entre gs e Ci ($r = 0,178$; $p = 0,106$) (Figura 3). Esses resultados sugerem que a limitação hídrica compromete a fotossíntese sobretudo via restrições estomáticas, enquanto a concentração interna de CO₂ tende a se manter relativamente estável entre os períodos avaliados.

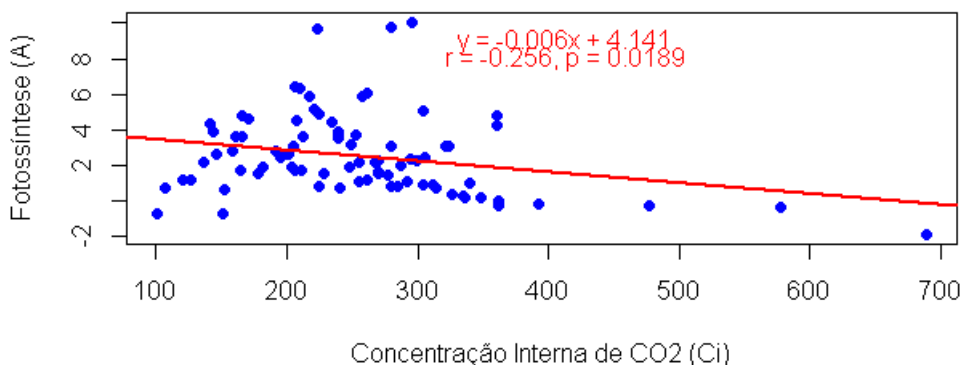
Figura 1 - Correlação entre Taxa de Fotossíntese (A) e Condutância Estomática (gs) em *C. canephora*.



Fonte: Os autores (2025).

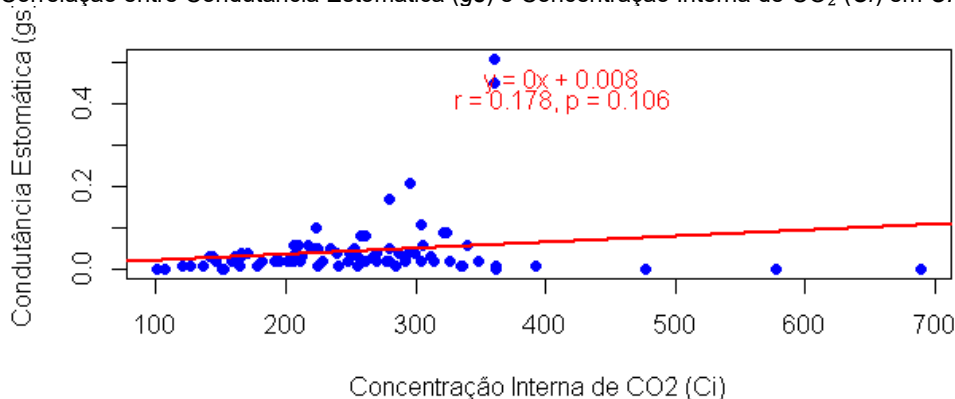
A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Figura 2 - Correlação entre Taxa de Fotossíntese (A) e Concentração Interna de CO_2 (C_i) em *C. canephora*.



Fonte: Os autores (2025)

Figura 3 - Correlação entre Condutância Estomática (g_s) e Concentração Interna de CO_2 (C_i) em *C. canephora*.



Fonte: Os autores (2025).

Discussão

Os resultados apresentados demonstram que Fotossíntese (A) Condutância Estomática (g_s) foram significativamente mais altas no período chuvoso, evidenciando a forte influência da disponibilidade hídrica sobre o desempenho fisiológico de *C. canephora*. Em contraste, a concentração interna de CO_2 (C_i) permaneceu estável entre períodos e genótipos, e não houve correlação significativa entre g_s e C_i , embora A e g_s apresentassem associação positiva. Esses achados indicam que a limitação da fotossíntese, nas condições estudadas, ocorreu principalmente por fatores estomáticos, ou seja, pela redução da abertura dos estômatos, e não por restrições na difusão ou utilização do CO_2 no interior das folhas (DaMatta *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2022).

Resultados semelhantes foram relatados por Pinheiro *et al.* (2004), que observaram que clones tolerantes à seca mantinham níveis estáveis de C_i , apresentavam maior eficiência no uso da água e recuperação rápida após reidratação. Além disso, características como plasticidade radicular e maior condutividade hidráulica contribuem para a resiliência do cafeeiro a períodos de déficit hídrico (Souza *et al.*, 2025). A correlação positiva entre A e g_s reforça a dependência da fotossíntese da abertura estomática, enquanto a baixa correlação entre A e C_i sugere que, nas condições avaliadas, a concentração interna de CO_2 não limitou a assimilação de carbono.

Embora não tenham sido observadas diferenças promissoras entre os genótipos quanto à tolerância à seca, os resultados fornecem informações importantes para programas de melhoramento, indicando que a condutância estomática é uma variável-chave para monitoramento hídrico em campo e que a estabilidade de C_i pode ser um indicativo de resiliência metabólica. Esses achados reforçam a

necessidade de abordagens integradas e multidisciplinares na seleção de genótipos superiores de *C. canephora*.

Conclusão

Os resultados deste estudo indicam que a disponibilidade hídrica é o principal fator determinante da fotossíntese e da condutância estomática em *C. canephora*, com valores significativamente maiores durante o período chuvoso. A concentração interna de CO₂ mostrou-se relativamente estável, sugerindo que não constitui limitação fisiológica nas condições avaliadas. Apesar de não terem sido observadas diferenças significativas entre genótipos, os dados apontam para a importância da condutância estomática como indicador de tolerância à seca, reforçado pela correlação positiva com a fotossíntese. Esses achados ressaltam a relevância da avaliação de parâmetros fisiológicos em campo para orientar programas de melhoramento e seleção de genótipos de café mais resilientes a períodos de déficit hídrico.

Referências

AVILA, R. T.; CARDOSO, A. A.; DE ALMEIDA, W. L.; COSTA, L. C.; MACHADO, K. L.; BARBOSA, M. L.; DAMATTA, F. M. Coffee plants respond to drought and elevated [CO₂] through changes in stomatal function, plant hydraulic conductance, and aquaporin expression. **Environmental and Experimental Botany**, v. 177, p. 104148, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104148>. Acesso em: 06/09/2025.

DAMATTA, F. M. Exploring drought tolerance in coffee: a physiological approach with some insights for plant breeding. **Brazilian journal of plant physiology**, v. 16, p. 1-6, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1677-04202004000100001>. Acesso em: 07/09/2025.

DAMATTA, F. M.; AVILA, R. T.; CARDOSO, A. A.; MARTINS, S. C.; RAMALHO, J. C. Physiological and agronomic performance of the coffee crop in the context of climate change and global warming: a review. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 66, n. 21, p. 5264-5274, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04537>. Acesso em: 07/09/2025.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). **Plano de Manejo da Floresta Nacional de Pacotuba**, p. 1, 2011. Disponível em: www.icmbio.gov.br/portal/.../Volume_I_Pacotuba_Junho_2011.pdf. Acesso em : 05/09/2025

PINHEIRO, H. A. **Physiological and morphological adaptations as associated with drought tolerance in Robusta coffee (Coffea canephora Pierre var. kouillou)**. 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/2066>. Acesso em: 08/09/2025

PINHEIRO, H. A.; DAMATTA, F. M.; CHAVES, A. R.; LOUREIRO, M. E.; DUCATTI, C. Drought tolerance is associated with rooting depth and stomatal control of water use in clones of *Coffea canephora*. **Annals of botany**, v. 96, n. 1, p. 101-108, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/aob/mci154>. Acesso em: 08/09/2025

PRAXEDES, S. C.; DAMATTA, F. M.; LOUREIRO, M. E.; FERRAO, M. A.; CORDEIRO, A. T. Effects of long-term soil drought on photosynthesis and carbohydrate metabolism in mature robusta coffee (*Coffea canephora* Pierre var. kouillou) leaves. **Environmental and experimental botany**, v. 56, n. 3, p. 263-273, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.02.008>. Acesso em: 06/09/2025.

SARZYNSKI, T.; VAAST, P.; RIGAL, C.; MARRACCINI, P.; DELAHAIE, B.; GEORGET, F.; ETIENNE, H. Contrasted agronomical and physiological responses of five *Coffea arabica* genotypes under soil water deficit in field conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1443900, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1443900>. Acesso em: 07/09/2025.

A Ciência do **NANO** e seu impacto transformador no **MACRO**

SILVA, P. C. D.; JUNIOR, W. Q. R.; RAMOS, M. L. G.; ROCHA, O. C.; VEIGA, A. D.; SILVA, N. H.; VINSON, C. C. Physiological changes of Arabica Coffee under different intensities and durations of water stress in the Brazilian Cerrado. **Plants**, v. 11, n. 17, p. 2198, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants11172198>. Acesso em: 05/09/2025.

SOBREIRA, F. B. S. **Respostas morfofisiológicas e herança materna para tolerância à seca em progênies de café conilon**. 2017. 95 f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre. 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/123456789/9146>. Acesso em: 05/09/2025.

SOUZA, G. A.; BARONI, D. F.; BERNADO, W. D. P.; SANTOS, A. R.; BARCELLOS, L. C. D. S.; BARCELOS, L. F.; CAMPOSTRINI, E. Leaf to Root Morphological and Anatomical Indicators of Drought Resistance in *Coffea canephora* After Two Stress Cycles. **Agriculture; Basel**, v. 15, n. 6, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture15060574>. Acesso em: 05/09/2025.

Agradecimentos

À CAPES, FAPES, UFES e Incaper.