

ALTERAÇÃO DAS TROCAS GASOSAS FOLIARES EM CAFEIROS SUBMETIDOS A DÉFICIT HÍDRICO DO SOLO E AUMENTO DE TEMPERATURA DO AR

Danielly Dubberstein¹, José N. Semedo^{2,3}, Fábio L. Partelli¹, Weverton P. Rodrigues⁴, Ana I. Ribeiro-Barros^{3,5}, António E. Leitão^{3,5}, Maria J. Silva^{3,5}, Isabel P. Pais^{2,3}, Ana D. Rodrigues⁶, Eliemar Campostrini⁴, Fernando J. Lidon⁵, Fabio M. DaMatta⁷, José C. Ramalho^{3,5}

¹ CEUNES, Universidade Federal Espírito Santo, São Mateus, Brasil. dany_dubberstein@hotmail.com, partelli@yahoo.com

² UIBRG, Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, I.P., Oeiras, Portugal. jose.semedo@iniav.pt, isabelppais@sapo.pt

³ PlantStress&Biodiversity Lab, LEAF, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Oeiras, Portugal. aribeiro@isa.utl.pt, antonioleitao@isa.ulisboa.pt, mariajosepsantos@gmail.com, cochichor@mail.telepac.pt

⁴ Setor Fisiologia Vegetal, CCTA, Universidade Estadual Norte Fluminense - Darcy Ribeiro, Campos dos Goitacazes, Brasil. campost@uenf.br, wevertonenf@hotmail.com

⁵ GeoBioTec, DCT, Fac. Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, Monte de Caparica, Portugal. fjl@fct.unl.pt

⁶ CEF, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. anadr@isa.ulisboa.pt

⁷ Dept. Biologia Vegetal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil. fdamatta@ufv.br

RESUMO: O calor e a seca constituem as principais limitações ao crescimento e produtividade das plantas, e a sua ocorrência conjunta tende a agravar os níveis de estresse. Este trabalho teve como objetivo estudar o impacto nas trocas gasosas foliares em plantas de *Coffea arabica* L. cv. Icatu e *C. canephora* cv. Conilon Clone 153 submetidas a duas condições hídricas (bem regadas, Ctl; seca severa, SS) em condições adequadas de temperatura (25/20°C, dia/noite), e a posterior aumento gradual de temperatura até 42/30 °C, seguido de um período de recuperação de 14 dias (Rec14) após reposição das condições controle de disponibilidade hídrica e temperatura. Foram avaliados parâmetros foliares relacionados as taxas de fotossíntese líquida (P_n), condutância estomática para o vapor de água (g_s) e transpiração (E). Os resultados evidenciaram fortes impactos em SS em P_n , g_s , E de ambos os genótipos. A exposição apenas ao aumento de temperatura provocou impactos diferentes. Nas plantas de CL153, P_n e g_s foram claramente afetados a 39/30 e 42/30 °C, enquanto Icatu apresentou decréscimos significativos a partir de 34/28 °C, mas mantendo esses valores até 42/30 °C. A exposição simultânea a ambas as condições de estresse provocou maiores impactos, com valores negligíveis ou negativos de P_n a serem observados a partir de 31/25 °C, ligados a valores de g_s muito reduzidos durante todo o experimento. No período de recuperação as plantas Icatu-Ctl apresentaram uma recuperação mais rápida (já a Rec4) e total em Rec7-10, enquanto as plantas Icatu-SS apresentam recuperação total apenas em Rec14. Já as plantas de CL153 mostraram uma recuperação mais lenta e incompleta, semelhante para as duas disponibilidades hídricas a partir de Rec7-10. Logo é visto que os impactos dos estresses se diferenciam quanto ao genótipo, evidenciando comportamento bastante distinto. Além disso, os estresses quando ocorridos sozinhos são menos drásticos (com certo nível de tolerância), mas isso muda com a exposição simultânea, agravando claramente os danos.

PALAVRAS-CHAVE: calor, trocas gasosas, fotossíntese, seca.

LEAF GAS EXCHANGES IN COFFEE PLANTS SUBMITTED TO SOIL WATER DEFICIT AND AIR TEMPERATURE INCREASE

ABSTRACT: Heat and drought are the main limiting conditions to plant growth and productivity, and their simultaneous occurrence tends to aggravate stress levels. We aimed at to study the impact in leaf gas exchanges of plants of *Coffea arabica* L. cv. Icatu and *C. canephora* cv. Conilon Clone 153 (CL153) submitted to two water conditions (well watered, Ctl; severe drought, SS) under adequate temperature conditions (25/20 °C, day/night), followed by a temperature increase up to 42/30, and a 14-day recovery period (Rec14) after the reposition of water and temperature control conditions. Leaf parameters related to the rates of net photosynthesis (P_n), stomatal conductance for water vapor (g_s), and transpiration (E) were evaluated. The results showed strong SS impacts in P_n , g_s , E showed of both genotypes. Temperature rise alone caused different impacts. In the CL153 plants, P_n and g_s were clearly affected at 39/30 and 42/30 °C, while Icatu showed significant decreases from 34/28 °C onwards, although keeping these values until 42/20 °C. The simultaneous exposure to both stress conditions caused the stronger impacts, with negligible or negative values of P_n from 31/25 °C onwards, together with quite low g_s values along the entire experiment. The Icatu-Ctl plants presented a faster recovery (already at Rec4) and total at Rec7-10, whereas the Icatu-SS plants showed a total recover only by Rec14. In contrast, the CL153 plants showed a slower and incomplete recovery, similar for both water availability conditions from Rec7-10 onwards. Therefore, it is seen that the impacts of the stresses differ for the genotype, evidencing quite different behavior. In addition, stresses when they occur alone are less drastic (with a certain level of tolerance), but this changes with simultaneous exposure, clearly aggravating the damage.

KEY WORDS: drought, heat, photosynthesis, leaf gas exchanges.

INTRODUÇÃO

O café é uma das mercadorias agrícolas mais transacionadas no mundo, com cerca de 125 milhões de pessoas envolvidas na sua cadeia de valor (MARTINS et al., 2016; DUBBERSTEIN et al., 2018). As espécies *Coffea arabica* L. e *C. canephora* Pierre ex A. Froehner são responsáveis por 99% da produção mundial, com exigências de cultivo distintas no que se refere à gama de valores de temperatura e precipitação. Previsões futuras de mudanças climáticas globais apontam para aumentos da temperatura, maior prevalência de períodos com seca e aumento da frequência de eventos extremos, com consequências para a produtividade, alteração das áreas adequadas para o cultivo e extinção de diversas espécies selvagens de café (ZARGAR et al., 2017; MOAT et al., 2019).

O desempenho global do processo fotossintético depende de um equilíbrio de condições ambientais, sendo que a seca e temperatura estão entre as que mais afetam a produtividade do cafeeiro (DaMATTA e RAMALHO, 2006; RAMALHO et al., 2014; MARIAS et al., 2017), com implicações desde o nível morfológico, passando por impactos ao nível fisiológico, bioquímico e mineral (MARTINS et al., 2014; 2016; RODRIGUES et al., 2016). Uma das primeiras respostas do cafeeiro para minimizar a perda de água pela transpiração em condições de restrição hídrica passa pela redução da abertura estomática (BATISTA et al. 2010; MELO et al., 2014; RONCHI et al., 2015). A resistência estomática é simultaneamente afetada por vários fatores ambientais, no entanto, o fecho estomático evita a ocorrência de danos ao nível metabólico, ajustando o seu funcionamento ao déficit hídrico da planta. Com isso, ocasiona alterações nas taxas de trocas gasosas, no que se refere à fotossíntese líquida, condutância estomática, transpiração, eficiência do uso da água e taxa fotossintética máxima. Neste contexto, pretendeu-se avaliar o impacto da restrição hídrica e aumento de temperatura nas trocas gasosas foliares em dois genótipos de cafeeiros.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram avaliadas plantas de dois genótipos de café, *Coffea arabica* L. cv. Icatu e *C. canephora* Pierre ex A. Froehner cv. Conilon Clone 153 (CL153) (Cultivar Encapa EMCAPA 8131) (BRAGANÇA et al., 2001), com sete anos de idade, cultivadas em câmaras de crescimento *walk-in* (EHHF 10000, ARALAB, Portugal), em vasos de 80 L com um substrato composto por solo, turfa e areia (3:1:3, v/v/v), mantidas em condições ambientais controladas de temperatura (25/20 °C, dia/noite), irradiância (cerca de 700-800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), $[\text{CO}_2]$ no ar (380 $\mu\text{L L}^{-1}$), umidade relativa (70%), fotoperíodo (12 h) e sem restrição de disponibilidade hídrica. As plantas foram submetidas a duas condições hídricas: 1) Controle (Ctl) - bem regadas, RWC_{pd} de ca. 95% e 2) seca severa (SS), através da suspensão gradual de rega, com $RWC_{pd} < 70\%$. Após cerca de 15 dias para atingir estes níveis e mais cinco dias de estabilização nessas condições, a temperatura foi gradualmente aumentada (0,5 °C dia^{-1} da temperatura diurna) desde 25/20 °C até 42/30 °C, com cinco dias de estabilização a 31/25, 37/28 e 42/30 °C para as avaliações. Após reestabelecimento das condições controle de temperatura (25/20 °C) e disponibilidade hídrica por rega avaliou-se a recuperação das plantas ao fim de 4 (Rec4), entre 7 e 10 (Rec7-10) e 14 dias (Rec14). O ensaio teve um total de 83 dias.

As determinações foram efetuadas em folhas recém-maduras, localizadas na parte superior (iluminada) de cada planta, e incluíram as taxas de fotossíntese líquida (P_n), condutância estomática para o vapor de água (g_s) e transpiração (E), e da $[\text{CO}_2]$ internas (C_i), toda em condições fotossintéticas de equilíbrio dinâmico após ca. 2 h de iluminação (meio da manhã). Foi utilizado um analisador portátil de gases infravermelhos de sistema aberto (Li-6400, LiCor, Lincoln, NE, EUA), com fornecimento externo de $[\text{CO}_2]$ de ca. 380 $\mu\text{L L}^{-1}$ e irradiância de ca. 700-800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. As variáveis foram analisadas por meio de uma *two-way* ANOVA ($P < 0,05$) para quantificar as diferenças entre as duas condições hídricas, entre as temperaturas, e sua interação, seguido pelo teste de Tukey para comparações de médias. Cada ANOVA foi realizada independentemente para cada um dos genótipos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados relativos mostram um impacto fortíssimo da seca severa em todos os parâmetros de trocas gasosas foliares avaliados (Tabela 1), nomeadamente através das reduções de 82% e 92% na P_n , e de 75% e 77% na g_s , para CL153 e Icatu, respectivamente. Para além de limitação devido ao fecho estomático, os resultados sugerem a existência de impactos não estomáticos (ao nível do mesófilo) na fotossíntese, pois o valor de C_i nas plantas SS é largamente superior ao das plantas Ctl apesar das primeiras terem valores de P_n muito mais baixos. Por outro lado, o impacto do aumento da temperatura nas plantas Ctl foi muito menor que o da seca a 25/120 °C. Decréscimos significativos de P_n foram observados apenas a partir de 39/30 °C em CL153, e 34/28 °C em Icatu, apesar de no último genótipo os valores se terem mantido posteriormente até 42/30 °C. Nesta temperatura, as plantas Ctl apresentaram reduções de 78% (CL153) e 44% (Icatu). Curiosamente, em CL153 a redução de P_n tal foi acompanhada por decréscimos de g_s , mas em Icatu houve até um aumento de g_s nas duas temperaturas mais altas. No seu conjunto, esses resultados refletem tolerância a temperaturas bem acima das consideradas adequadas para o cafeeiro e a manutenção de funcionamento fotossintético relevante a 37/28 °C (ou mesmo a 39/30 °C em Icatu).

Tabela 1. Avaliação das taxas de fotossíntese líquida (P_n), condutância estomática para o vapor de água (g_s), transpiração (E) em *Coffea canephora* cv. Conilon Clone 153 (CL153) e *Coffea arabica* cv. Icatu submetidas a duas condições hídricas (controle, Ctl; seca severa, SS) e crescentes níveis de temperatura de 25/20 °C (controle) até 42/30 °C (dia/noite) e recuperação ao fim de 4 (Rec4), 7-10 (Rec7-10) e 14 (Rec14) dias após reposição controle das condições hídricas e de temperatura. Os valores representam a média ± erro padrão (n=6). As médias seguidas por mesmas letras maiúsculas (A, B, C, D; para níveis de temperatura), ou minúsculas (a, b; para níveis de água) não diferem estatisticamente entre si. A análise foi efetuada separadamente para cada genótipo.

Genótipo	Água	Temperatura (dia/noite)									
		25/20 °C	28/23 °C	31/25 °C	34/28 °C	37/28 °C	39/30 °C	42/30 °C	Rec4	Rec7-10	Rec14
		P_n ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)									
CL 153	Ctl	5,68 ± 0,48aA	3,85 ± 0,46aAB	3,72 ± 0,25aAB	3,29 ± 0,51aBC	4,20 ± 1,17aAB	1,23 ± 0,18aC	1,24 ± 0,30aC	2,91 ± 0,35aBC	3,11 ± 0,20aBC	4,33 ± 0,10aAB
	SS	1,01 ± 0,65bA	0,43 ± 0,19bB	-0,09 ± 0,16bB	0,00 ± 0,25bB	-0,16 ± 0,25bB	-0,25 ± 0,07bB	-0,48 ± 0,18bB	1,51 ± 0,29bB	3,87 ± 0,59aA	4,13 ± 0,54aA
Icatu	Ctl	5,06 ± 0,40aAB	4,43 ± 0,41aABC	4,16 ± 0,37aABCD	2,77 ± 0,26aCD	2,76 ± 0,36aCD	2,71 ± 0,39aD	2,85 ± 0,41aCD	4,17 ± 0,15aBCD	5,31 ± 0,44aAB	6,12 ± 0,48aA
	SS	0,41 ± 0,29bCD	0,14 ± 0,26bD	-0,35 ± 0,07bD	-0,01 ± 0,26bD	0,15 ± 0,16bD	-0,13 ± 0,07bD	-0,13 ± 0,15bD	1,87 ± 0,35bC	3,61 ± 0,65bB	5,39 ± 0,46aA
		g_s ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)									
CL 153	Ctl	43,3 ± 6,9aB	52,8 ± 2,6aA	32,7 ± 4,2aAB	32,8 ± 3,2aAB	52,6 ± 11,2aA	27,7 ± 8,5aB	21,3 ± 4,2aB	27,7 ± 3,6aB	36,6 ± 3,6aAB	37,2 ± 3,5aAB
	SS	10,7 ± 6,8bC	9,7 ± 2,2bC	10,6 ± 1,7bC	7,4 ± 1,1bC	9 ± 1,5bC	5,6 ± 0,6bC	7,0 ± 1,0bC	17,0 ± 3,5aBC	50,9 ± 8,3aA	40,0 ± 8,7aAB
Icatu	Ctl	48,7 ± 5,1aBC	43,5 ± 8,8aC	42,7 ± 8,8aC	29,3 ± 2,9aC	28,6 ± 4,6aC	51,3 ± 8,6aBC	77,4 ± 12,8aAB	57,8 ± 3,6aABC	78,5 ± 12,5aAB	77,7 ± 13,2aAB
	SS	11,4 ± 2,7bC	6,6 ± 1,0bC	6,2 ± 0,8bC	6,6 ± 1,4bC	4,8 ± 1,2bC	6,3 ± 0,4bC	5,0 ± 0,5bC	19,4 ± 1,8bBC	49,0 ± 6,7bBC	66,8 ± 9,5aA
		C_i ($\mu\text{L L}^{-1}$)									
CL 153	Ctl	160,2 ± 29,1bA	248,3 ± 20,9bA	166,5 ± 18,3bA	250,2 ± 15,0bA	235,0 ± 19,0bA	257,5 ± 17,0bA	267,2 ± 16,3bA	186,0 ± 5,8aA	218,7 ± 7,5aA	155,0 ± 15,4aA
	SS	312,0 ± 62,9aABCD	352,2 ± 37,9aABC	397,4 ± 23,7aA	341,6 ± 51,5aABC	376,7 ± 42,5aAB	410,4 ± 13,9aA	422,8 ± 30,5aA	218,2 ± 36,3aCD	251,7 ± 11,0aBCD	184,3 ± 27,2aD
Icatu	Ctl	166,7 ± 44,1bA	203,0 ± 67,4bA	197,9 ± 29,8bA	220,1 ± 20,3bA	194,7 ± 27,0bA	258,3 ± 5,3bA	267,8 ± 15,3bA	237,2 ± 3,2aA	233,7 ± 12,3aA	204,8 ± 14,7aA
	SS	317,5 ± 20,6aBCDE	348,4 ± 53,0aABCD	452,4 ± 15,8aA	345,2 ± 47,5aA	274,8 ± 32,2aABCD	378,6 ± 17,7aABC	414,7 ± 21,5aAB	213,5 ± 20,8aE	205,3 ± 17,8aE	253,0 ± 41,6aDE
		E ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)									
CL 153	Ctl	0,409 ± 0,066aD	0,835 ± 0,104aBC	0,951 ± 0,053aBCD	1,926 ± 0,462aA	1,818 ± 0,371aAB	1,328 ± 0,287aABC	1,201 ± 0,210aABCD	0,520 ± 0,055aCD	0,567 ± 0,049aCD	0,616 ± 0,064aCD
	SS	0,136 ± 0,086aA	0,209 ± 0,037bA	0,406 ± 0,065bA	0,310 ± 0,047bA	0,480 ± 0,034bA	0,329 ± 0,033bA	0,479 ± 0,071bA	0,354 ± 0,070aA	0,640 ± 0,076aA	0,549 ± 0,093aA
Icatu	Ctl	0,362 ± 0,064aD	0,923 ± 0,190aCD	0,916 ± 0,081aCD	1,134 ± 0,069aC	1,278 ± 0,217aC	2,080 ± 0,237aB	2,938 ± 0,435aA	1,015 ± 0,071aCD	1,003 ± 0,050aCD	0,969 ± 0,080aCD
	SS	0,145 ± 0,023aB	0,089 ± 0,050bB	0,208 ± 0,034bAB	0,280 ± 0,056bAB	0,245 ± 0,056bAB	0,362 ± 0,022bAB	0,327 ± 0,040bAB	0,401 ± 0,030bAB	0,540 ± 0,084bAB	0,833 ± 0,116aA

De 37/28 °C a 42/30 °C a taxa de transpiração (E) sobe fortemente, apesar de este gasto de água nem sempre ser acompanhado de maior g_s , explicado pela maior déficit de pressão de vapor entre o ar e a folha (HAWORTH et al., 2018a,b). De acordo com Wahid et al. (2007) a nível das folhas, o estresse de alta temperatura reduz a fotossíntese, aumenta a fotorrespiração e a respiração mitocondrial e influencia as relações hídricas e a condutância estomática. As plantas Ctl de Icatu apresentaram as maiores taxas de transpiração.

A presença concomitante dos estresses promoveu impactos mais profundos nos parâmetros de trocas gasosas foliares. De fato, nos dois genótipos em estudo, a imposição simultânea dos estresses revelou-se muito penalizante, com severas reduções de P_n , g_s , E pelo que a baixa g_s limitará (pelo menos parcialmente) P_n . Para as plantas SS dos genótipos, os valores de P_n foram negligíveis (ou negativos) desde 28/23 °C até 42/30 °C (durante 42 a 49 dias), o que poderá estar ligado a valores muito baixos de g_s durante esse período (o que não impediu algum aumento de E). Contudo, o aumento considerável na concentração interna de CO_2 (C_i), mostra que não há limitação de CO_2 para a carboxilação, pelo que nestas condições (SS e 42/30 °C) as limitações não-estomáticas terão igualmente um importante peso na limitação de P_n . Em geral, as plantas abrem seus estômatos para diminuir a temperatura das folhas pela transpiração quando submetidas a temperaturas elevadas do ar (como visto em Icatu-Ctl), mas são incapazes de fazer o mesmo quando simultaneamente submetidas a condições de seca e alta temperatura. Como resultado, a temperatura das folhas permanece alta (BARNABAS et al., 2008; JIN et al., 2016). Estes resultados estão em linha com as observações de que o efeito da combinação de calor e seca é mais prejudicial sobre o crescimento e a produtividade das culturas, em comparação com esses estresses impostos de forma individual (MARIAS et al., 2017; DUBBERSTEIN et al., 2018; SEMEDO et al., 2018; HOWARTH et al., 2018a).

No período de recuperação as plantas Icatu-Ctl apresentaram uma recuperação mais rápida (já a Rec4) e total em Rec7-10, enquanto as plantas Icatu-SS apresentam recuperação total apenas em Rec14. Já as plantas de CL153 mostraram uma recuperação mais lenta e incompleta, semelhante para as duas disponibilidades hídricas a partir de Rec7-10. Estes resultados confirmam que o cafeeiro apresenta uma resiliência interessante aos estresses ambientais, principalmente aqueles relacionados à escassez de água e temperatura (DaMATTA e RAMALHO, 2006; RAMALHO et al., 2014), com particular interesse em Icatu que mostrou menor impacto na P_n e g_s a 42/30 °C e uma recuperação mais rápida e total ao fim de 2 semanas de reposição das condições de disponibilidade hídrica e de temperatura.

CONCLUSÕES

- 1 - P_n , g_s , E mostraram impactos da seca severa em ambos os genótipos;
- 2 - A exposição apenas ao aumento de temperatura provocou impactos diferentes. Nas plantas de CL153, a P_n e g_s foi claramente afetados a 39/30 °C e 42/30 °C, enquanto Icatu apresentou decréscimos significativos a partir de 34/28 °C.
- 3 - A exposição simultânea a ambas as condições de estresse provocaram os maiores impactos.
- 4 - Quanto à recuperação Icatu-Ctl apresentou total recuperação em Rec7-10 e Icatu-SS em Rec14. Já as plantas de CL153 mostraram uma recuperação mais lenta e incompleta.
- 5 - Estes resultados evidenciam que os impactos das mudanças climáticas são sérios e comprometedores aos cafeeiros, mas com algumas diferenças entre os genótipos e nos níveis de estresse sozinhos ou em conjunto.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 (D. Dubberstein), e teve suporte financeiro da União Europeia, Programa

Horizon 2020, edital H2020-SFS-2016-2, ação RIA, projeto BreedCAFS, proposta 727934, e de fundos portugueses da Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do projeto PTDC/ASP-AGR/31257/2017 e das unidades de investigação UID/AGR/04129/2013 (LEAF) e UID/GEO/04035/2013 (GeoBioTec). Financiamento do CNPq (bolsas a E. Campostrini, F.L. Partelli, e F.M. DaMatta) são também reconhecidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARNABAS, B., JAGER, K & FEHER, A. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant Cell Environmental* 31:11-38 (2008).
- BATISTA, L. A., GUIMARÃES, R. J., PEREIRA, F. J., CARVALHO, G. R & CASTRO, E. M. de. Anatomia foliar e potencial hídrico na tolerância de cultivares de café ao estresse hídrico. *Revista Ciência Agronômica* 41:475-481 (2010).
- BRAGANCA, S. M., CARVALHO, C. H. S de., FONSECA, A. F. A da., & FERRO, R. G. Variedades clonais de café Conilon para o Estado do Espírito Santo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 36:765-770 (2001).
- CAVATTE P. C., OLIVEIRA A. A. G., MORAIS L. E., MARTINS, S. C. V., SANGLARD, L. M. V. P & DaMATTA F. M. Could Shading Reduce the Negative Impacts of Drought on Coffee? A Morphophysiological Analysis. *Physiologia Plantarum* 144:111-122 (2012).
- DaMATTA, F. M & RAMALHO, J. C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 18:55-81 (2006).
- DaMATTA, F.M., AVILA, R.T., CARDOSO, A.A., MARTINS, S.C.V., 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* 66(21):5264-5274 (2018). DOI: 10.1021/acs.jafc.7b04537.
- DaMATTA, F.M., RAHN, E., LÄDERACH, P., GHINI, R., RAMALHO, J.C. Why could the coffee crop endure climate change and global warming to a greater extent than previously estimated? *Climatic Change* 152(1):167-178 (2019). DOI: 10.1007/s10584-018-2346-4.
- DUBBERSTEIN, D., RODRIGUES, W. P., SEMEDO, J. N., RODRIGUES, A. P., PAIS, I. P., LEITÃO, A. E., PARTELLI, F. L., CAMPOSTRINI, E., REBOREDO, F., SCOTTI-CAMPOS, P., LIDON, F.C., RIBEIRO-BARROS, A. I., DaMATTA, F. M & RAMALHO, J. C. Mitigation of the Negative Impact of Warming on the Coffee Crop: The Role of Increased Air [CO₂] and Management Strategies. In: Shanker, A. (Ed.). *Climate Resilient Agriculture, Strategies and Perspectives*. Londres: IntechOpen, Cap.4, p. 57-85 (2018).
- HAWORTH, M., COSENTINO, S. L., MARINO, G., BRUNETTI, C., RIGGI, E., AVOLA, G., LORETO, F & CENTRITTO, M. Increased free abscisic acid during drought enhances stomatal sensitivity and modifies stomatal behaviour in fast growing giant reed (*Arundo donax* L.). *Environmental and Experimental Botany* 147:116-124 (2018a).
- HAWORTH, M., MARINO, G., BRUNETTI, C., KILLI, D., DE CARLO, A & CENTRITTO, M. The Impact of Heat Stress and Water Deficit on the Photosynthetic and Stomatal Physiology of Olive (*Olea europaea* L.) A Case Study of the 2017 Heat Wave. *Plants* 7:76 (2018b).
- JIN, R., WANG, Y., LIU, R., GOU, J & CHAN, Z. Physiological and Metabolic Changes of Purslane (*Portulaca oleracea* L.) in Response to Drought, Heat, and Combined Stresses. *Frontier Plant Science* 6:1123 (2016).
- MARIAS, D. E., MEINZER, F. C & STILL, C. Impacts of leaf age and heat stress duration on photosynthetic gas exchange and foliar nonstructural carbohydrates in *Coffea arabica*. *Ecology and Evolution* 7:1297-1310 (2017).
- MARTINS, L.D., TOMAZ, M.A., LIDON, F.C., RAMALHO, J.C. Combined effects of elevated [CO₂] and high temperature on leaf mineral balance in *Coffea* spp. plants. *Climatic Change* 126(3-4), 365-379 (2014). DOI: 10.1007/s10584-014-1236-7.
- MARTINS, M. Q., RODRIGUES, W. P., FORTUNATO, A. S., LEITÃO, A. E., RODRIGUES, A. P., PAIS, I. P., MARTINS, L. D., SILVA, M. J., REBOREDO, F. H., PARTELLI, F. L., CAMPOSTRINI, E., TOMAZ, M. A., SCOTTI-CAMPOS, P., RIBEIRO-BARROS, A. I., LIDON, F. C., DaMATTA, F. M & RAMALHO, J.C. Protective Response Mechanisms to Heat Stress in Interaction with High [CO₂] Conditions in *Coffea* spp. *Frontiers in Plant Science* 29:947-964 (2016).
- MELO, E. F., FERNANDES-BRUM, C. N., PEREIRA, F. J., CASTRO, E. M & CHALFUN-JÚNIOR, A. Anatomic and physiological modifications in seedlings of *Coffea arabica* cultivar Siriema under drought conditions. *Ciência e Agrotecnologia* 38:25-33 (2014).
- MOAT, J., GOLE, T. W & DAVIS, A.P. Least concern to endangered: Applying climate change projections profoundly influences the extinction risk assessment for wild Arabica coffee. *Global Change Biology* 25:390-403 (2019).
- PELOSO, A. F.; TATAGIBA, S. D.; REIS, E. F.; PEZZOPANE, J. E. M.; AMARAL, J. F. T. Limitações fotossintéticas em folhas de cafeeiro arábica promovidas pelo déficit hídrico. *Coffee Science* 12(3):389-399 (2017). DOI: <http://dx.doi.org/10.25186/cs.v12i3.1314>
- PRASCH, C. M & SONNEWALD, U. Simultaneous application of heat, drought, and virus to Arabidopsis plants reveals significant shifts in signaling networks. *Plant Physiology* 162:1849-1866 (2013).
- RAMALHO, J. C., DaMATTA, F. M., RODRIGUES, A. P., SCOTTI-CAMPOS, P., PAIS, I., BATISTA-SANTOS, P., PARTELLI, F. L., RIBEIRO, A., LIDON, F. C & LEITÃO, A. E. Cold impact and acclimation response of *Coffea* spp.

plants. *Theoretical and Experimental Plant Physiology* 26:5-18 (2014).

RODRIGUES, W. P., MARTINS, M. Q., FORTUNATO, A. S., RODRIGUES, A. P., SEMEDO, J. N., SIMÕES-COSTA, M. C., PAIS, I. P., LEITÃO, A. E., COLWELL, F., GOULAO, L., MÁGUAS, C., MAIA, R., PARTELLI, F. L., CAMPOSTRINI, E., SCOTTI-CAMPOS, P., RIBEIRO-BARROS, A. I., LIDON, F. C., DaMATTA, F. M & RAMALHO, J. C. Long-term elevated air [CO₂] strengthens photosynthetic functioning and mitigates the impact of supraoptimal temperatures in tropical *Coffea arabica* and *C. canephora* species. *Global Change Biology* 22:415-431 (2016).

RONCHI, C.P.; ARAÚJO, F.C.; ALMEIDA, W.L.; SILVA, M.A.A.; MAGALHÃES, C.E.O.; OLIVEIRA, L.B.; DRUMOND, L.C.D. Respostas ecofisiológicas de cafeeiros submetidos ao déficit hídrico para concentração da florada no Cerrado de Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 50(1):24-32, 2015 DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2015000100003>.

SEMEDO, J. N., RODRIGUES, W. P., DUBBERSTEIN, D., MARTINS, M. Q., MARTINS, L. D., PAIS, I. P., RODRIGUES, A. P., LEITÃO, A. E., PARTELLI, F. L., CAMPOSTRINI, E., TOMAZ, M. A., REBOREDO, F. H., SCOTTI-CAMPOS, P., RIBEIRO-BARROS, A. I., LIDON, F. C., DAMATTA, F. M & RAMALHO, J.C. Coffee Responses to Drought, Warming and High [CO₂] in a Context of Future Climate Change Scenarios. In: ALVES, F., LEAL FILHO, W & AZEITEIRO, U. (Ed.). *Climate Change Management. Theory and Practice of Climate Adaptation*. Springer, Cap. 26, p. 465-477 (2018).

WAHID, A., GELANI, S., ASHRAF, M & FOOLAD, M. R. Heat tolerance in plants: an overview. *Environmental and Experimental Botany* 61:199-223 (2007).

ZARGAR, S. M., GUPTA, N., NAZIR, M., MAHAJAN, R., MALIK, F. A., SOF, N. R., SHIKARI, A. B & SALGOTRA, R. K. Impact of drought on photosynthesis: Molecular perspective. *Plant gene* 11:154-159 (2017).