

**Propriedades fotossintéticas e trocas gasosas de folhas de plantas soja  
(*Glycine max*) sob elevada [CO<sub>2</sub>] num cenário de mudança climática****Photosynthetic properties and gas exchange of leaves of soybean plants  
(*Glycine max*) under high [CO<sub>2</sub>] in a climate change scenario**

DOI:10.34117/bjdv5n7-123

Recebimento dos originais: 14/06/2019

Aceitação para publicação: 11/07/2019

**João Batista Lopes da Silva**

Engenheiro Agrícola e Ambiental, Doutor de Engenharia Agrícola, Professor  
Instituição: Universidade Federal do Sul da Bahia, Campus Paulo Freire  
Endereço: Praça Joana Angélica, 250, Teixeira de Freitas-BA, 45988-058  
E-mail: silvajbl@ufsb.edu.br

**Milton Edgar Pereira-Flores**

Engenheiro Agrônomo, Doutor em Fitotecnia, Pós-Doutorando em Meteorologia Agrícola  
Instituição: Universidade Federal de Viçosa  
Endereço: Avenida Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG, 36570-977  
E-mail: miltonpereira2001@yahoo.com

**Flávio Barbosa Justino**

Meteorologista, Doutor em Meteorologia, Professor  
Instituição: Universidade Federal de Viçosa  
Endereço: Avenida Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG, 36570-977  
E-mail: fjustino@ufv.br

**Amanda Santana Toledo**

Engenheira Agrônoma, Doutora em Meteorologia Agrícola  
E-mail: asantanatoledo@yahoo.com.br

**Luanna Chácara Pires**

Zootecnista, Doutora em Zootécnica, Professora  
Instituição: Universidade Federal do Sul da Bahia, Campus Paulo Freire  
Endereço: Praça Joana Angélica, 250, Teixeira de Freitas-BA, 45988-058 E-mail:  
luanna@ufsb.edu.br

**Eduardo Gusmão Pereira**

Biólogo, Doutor em Fisiologia Vegetal, Professor  
Instituição: Universidade Federal de Viçosa  
Endereço: Avenida Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG, 36570-977  
E-mail: egpereira@ufv.br

**Bruno Silva Dias**

Engenheiro Agrícola e Ambiental  
E-mail: cron\_isia@hotmail.com

**RESUMO**

Objetivou-se neste trabalho caracterizar as taxas fotossintéticas, transpiração, condutância estomática, uso eficiente da água e o efeito da aclimação pelo longo tempo de exposição à alta [CO<sub>2</sub>] em plantas de soja (*Glycine max*). O experimento foi realizado entre novembro de 2011 a março de 2012, com a cultivar de soja BRS Valiosa RR. Todas as plantas foram cultivadas em câmaras de topo aberto (OTC), com os tratamentos: T1 plantas cultivadas com alta [CO<sub>2</sub>]; e T2 - plantas cultivadas com [CO<sub>2</sub>] ambiente. Foram realizadas cinco medições da taxa fotossintética máxima (*A<sub>max</sub>*), transpiração (*E*) e condutância estomática (*g<sub>s</sub>*), com as aclimações fotossintética e estomática determinadas entre as 2<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> medições, pela troca da exposição da [CO<sub>2</sub>] do ambiente das plantas. A eficiência do uso da água (*WUE*) foliar foi determinada pela razão entre *A<sub>max</sub>* e *E*. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições. A análise de variâncias foi realizada pelo teste de F ( $p < 0,05$ ) e a pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As *A<sub>max</sub>* foram maiores para T1, assim como as menores *g<sub>s</sub>* e *E*, determinando melhor *WUE*. Em exposição a [CO<sub>2</sub>] ambiente, T1 apresentou menores *A<sub>max</sub>* e pior *WUE* do que T2. Contudo em exposição a alta [CO<sub>2</sub>], T2 apresentou maiores *A<sub>max</sub>*, denotando uma aclimação fotossintética. A soja apresenta incrementos na taxa fotossintética e na eficiência do uso da água, como também redução na taxa de transpiração em atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub>. Porém, em contrapartida, devido ao longo de tempo de exposição à alta [CO<sub>2</sub>] as plantas apresentam aclimação fotossintética, porém não apresentam aclimação estomática.

**Palavras-chaves:** fotossíntese, aclimação, condutância estomática

**ABSTRACT**

The aim's work was to characterize the photosynthetic rates, transpiration, stomatal conductance, water efficiency and the effect of acclimation by long exposure to high [CO<sub>2</sub>] in soybean plants (*Glycine max*). The experiment was carried out between November 2011 and March 2012, with soybean cultivar BRS Valiosa RR. All plants were cultivated in open top chambers (OTC), with treatments: T1 plants grown with high [CO<sub>2</sub>]; and T2 - plants grown with [CO<sub>2</sub>] environment. Five measurements of the maximum photosynthetic rate (*A<sub>max</sub>*), transpiration (*E*) and stomatal conductance (*g<sub>s</sub>*) were performed with the photosynthetic and stomatal acclimations determined between the 2nd and 5th measurements, by changing the [CO<sub>2</sub>] exposure of the plant environment. The leaf water use efficiency (*WUE*) was determined by the ratio between *A<sub>max</sub>* and *E*. The experimental design was a randomized complete block design, with four replications. The analysis of variances was performed by the F test ( $p < 0.05$ ) and by the Tukey test ( $p < 0.05$ ). The *A<sub>max</sub>* were larger for T1, as were the smaller *g<sub>s</sub>* and *E*, determining *WUE* better. In exposure to [CO<sub>2</sub>] environment, T1 presented smaller *A<sub>max</sub>* and worse *WUE* than T2. However, in exposure to high [CO<sub>2</sub>], T2 showed higher *A<sub>max</sub>*, denoting a photosynthetic acclimation. The soybean presents increases in the photosynthetic rate and the efficiency of the water use, as well as reduction in the rate of transpiration in atmosphere enriched with CO<sub>2</sub>. However, due to the long exposure time to the [CO<sub>2</sub>], the plants exhibit photosynthetic acclimation, but they do not present stomatal acclimatization.

**Keywords:** photosynthesis, acclimation, stomatal conductance.

## 1 INTRODUÇÃO

Para as plantas a atual [CO<sub>2</sub>] na atmosfera é um fator limitante para a fotossíntese de espécies cultivadas que apresentam máximos de fotossíntese em concentrações maiores que 400 ppm de CO<sub>2</sub> (Oliveira, 2007), sendo também um fator regulador para a condutância estomática (Ainsworth & Rogers, 2007). Na folha, a taxa fotossintética é resultado direto da atividade da enzima *ribulose-1-5-bifosfato-carboxilase-oxigenase* (Rubisco) que, por sua vez, é influenciada por vários fatores ambientais, incluindo as concentrações de CO<sub>2</sub>, temperatura do ar, radiação e nutrientes (Griffin & Luo, 1999). A exposição à alta [CO<sub>2</sub>] estimula a fotossíntese e o aumento da acumulação de carbono principalmente em plantas com via fotossintética do C<sub>3</sub> (Ainsworth & Long, 2005).

As plantas do tipo C<sub>3</sub> são mais sensíveis as variações nas [CO<sub>2</sub>] do que as C<sub>4</sub> (Mera et al., 2006). Em geral, [CO<sub>2</sub>] entre 200 à 400 ppm acima da concentração ambiente elevam também a [CO<sub>2</sub>] na câmara subestomática (Ziska e Bunce, 2006) de plantas C<sub>3</sub>, o que pode levar a incrementos de 30 % na taxa de assimilação do carbono, devido ao aumento de duas à três vezes na atual [CO<sub>2</sub>] atmosférica. Esse efeito é devido, principalmente, à maior eficiência carboxilativa na Rubisco, pela maior disponibilidade de CO<sub>2</sub>, e, conseqüentemente, pela redução em torno de 20% no processo fotorrespiratório (Griffin & Luo, 1999). Porém, devido ao longo tempo de exposição à alta [CO<sub>2</sub>], as plantas durante seu ciclo podem apresentar significativa aclimação fotossintética, que é a redução da capacidade fotossintética nas plantas cultivadas em altas [CO<sub>2</sub>], quando comparadas com as plantas cultivadas sob [CO<sub>2</sub>] ambiente e exposições instantâneas à altas [CO<sub>2</sub>] (Lee et al., 2011). Esta aclimação fotossintética, também depende de outros fatores ambientais como temperatura e disponibilidade de água e nutrientes, principalmente de nitrogênio (Griffin & Luo, 1999). A aclimação da capacidade fotossintética em alta [CO<sub>2</sub>] é observada concomitantemente com o decréscimo do nitrogênio foliar (Lee et al., 2001; Ellsworth et al., 2004; Ainsworth & Long, 2005; Crous et al., 2010), particularmente em plantas não leguminosas. Também, foram observados redução no conteúdo, nas taxas de atividade e regeneração da enzima Rubisco, redução na taxa de transporte de elétrons (Rogers & Humphreys, 2000; Ainsworth et al., 2003; Lee et al., 2001) e desequilíbrio na relação fonte-dreno, e força de drenos como, por exemplo, no enchimento de grãos em cereais (Isopp et al., 2000; Rogers & Ainsworth, 2006).

Ocorrem também reduções, em média 20% (Ainsworth & Long, 2005), na condutância estomática em plantas expostas a alta [CO<sub>2</sub>], o que também influencia na fotossíntese e transpiração, e as relações de uso da água por unidade de carbono fixado, ou eficiência no uso da água, devido ao aumento da fotossíntese e redução da transpiração (Griffin & Luo, 1999). Longos períodos de exposição a altas [CO<sub>2</sub>], podem também induzir aclimação estomática, condicionando assim a taxa média de trocas de gases (Ziska & Bunce, 2006).

Plantas de soja cultivadas em elevadas [CO<sub>2</sub>] apresentam grande estímulo na taxa fotossintética (Prior et al., 1991; Griffin & Luo, 1999; Costa, 2003; Lee et al., 2011). Entretanto, esses aumentos na taxa fotossintética podem ser reduzidos em torno de 40% sob longos períodos de exposição da soja às elevadas [CO<sub>2</sub>] (Bernacchi et al., 2005; Lee et al., 2011). Plantas leguminosas como a soja, podem diminuir o efeito da aclimatação fotossintética e estomática devido à fixação de N por simbiose (Rogers et al., 2009). A redução da condutância estomática na soja sob alta [CO<sub>2</sub>] foi relatada entre 40 a 50% inicialmente com reduções com o tempo de exposição (Griffin & Luo, 1999; Ainsworth & Long, 2005).

A aclimatação pode ser avaliada a través de várias formas. Uma via pode ser a comparação de plantas sob os efeitos de elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> e as crescidas em condições do ambiente. A comparação dos parâmetros das curvas de resposta a luz e medidas de trocas de CO<sub>2</sub>, vapor de água e concentrações entre a atmosfera e a câmara subestomática podem também caracterizar bem o processo de aclimatação instantânea ou de longo prazo. Desta forma, neste trabalho objetivou-se caracterizar as taxas fotossintéticas, transpiração, condutância estomática, uso eficiente da água e o efeito da aclimatação pelo longo tempo de exposição à alta [CO<sub>2</sub>] em plantas de soja (*Glycine max*).

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na estação lisimétrica no campus da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG (20°45'S, 42°45'W), entre novembro de 2011 a março de 2012. Os lisímetros com seção de 1,0 m x 1,4 m e profundidade de 0,8 m, foram preenchidos com Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, de classe textural muito argilosa, onde se fez a correção da acidez por calagem. Foram realizadas duas adubações durante o experimento uma de plantio e outra de cobertura, ambas na dosagem de 40 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de supersimples, 60 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O na forma de cloreto de potássio e 10 kg ha<sup>-1</sup> de N na forma de sulfato de amônio. A cultivar de soja utilizada foi a BRS Valiosa RR, de ciclo médio a semitardio (123 a 130 dias). O espaçamento entre plantas foi 0,09 m e entre fileiras 0,50 m, totalizando 30 plantas por lisímetro (unidade experimental), aproximadamente de 214.000 plantas/ha.

Todas as plantas foram cultivadas dentro de câmaras de topo aberto (OTC), desenvolvidas por Silva et al. (2012), compostas por módulos retangulares (Figura 1) adicionáveis para acompanhar o crescimento em altura das plantas. Cada OTC possui um ventilador excêntrico conectado a um sistema de distribuição de ar composto por tubos de PVC perfurados. No interior das câmaras utilizaram-se duas [CO<sub>2</sub>], 380 ppm (ambiente) e 700 ppm. Nas plantas cultivadas com [CO<sub>2</sub>] de 700 ppm, fez-se a exposição diária entre 6:00 às 18:00h a partir de 30° até 120° dias após o plantio (DAP) correspondentes aos estádios V2 e R8. A exposição do CO<sub>2</sub> nos horários indicados, foi realizada com auxílio de uma válvula solenoide instalada antes dos reguladores de pressão e fluxo. A dosagem da concentração foi monitorada e ajustada diariamente pela manhã com medidor de [CO<sub>2</sub>] do ambiente, Modelo 535 da Testo®. A temperatura média no interior das OTC foi, em média, de 2° C acima da temperatura média

do ambiente externo. As temperaturas foram registradas por uma estação meteorológica portátil, modelo Vantage Pro da Davis®.

As plantas foram irrigadas por meio de fitas gotejadoras e as lâminas de irrigação foram aplicadas diariamente para manter o solo próximo à capacidade de campo ( $CC = 33,62\%$ ). O monitoramento do teor de água no solo foi realizado pela técnica Time Domain Reflectometry com instrumento TDR100 da Campbell Scientific®, com sondas instaladas a 0,20 m de profundidade no solo e leituras automáticas a cada hora.

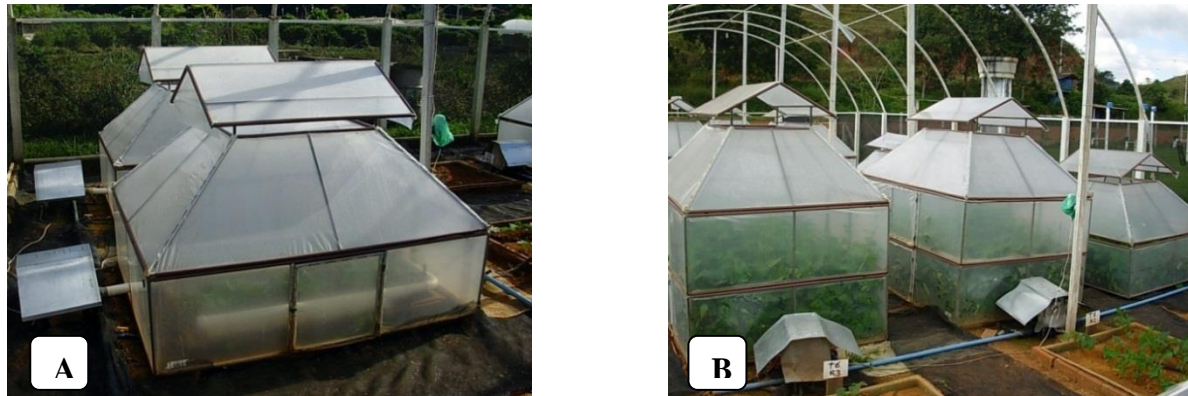


Figura 1. Vista das câmaras de topo aberto e o sistema de influxo de ar. A - Câmaras com um módulo, entre 1° ao 75° DAP; e B - Câmaras com dois módulos, entre 76° ao 135° DAP.

O ponto de saturação de luz ( $Q_{sat}$ ) utilizado nas avaliações de trocas gasosas, foi determinado na segunda folha totalmente expandida das plantas de soja no estágio V2 (41° DAP) por meio da curva de saturação de luz com variação da densidade de fluxo de fótons entre 0 à  $2.000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  da fonte de luz do analisador IRGA (Infra Red Gases Analyser), modelo LCI+ da ADC. No ponto de saturação de luz é provável encontrar a taxa fotossintética máxima ( $A_{max}$ ) nas folhas. As temperaturas e umidades foram as do ambiente em que as plantas se encontravam.

A taxa fotossintética máxima ( $A_{max}$ ), transpiração ( $E$ ) e condutância estomática ( $g_s$ ) foram mensuradas no período da manhã, entre 8:00 e 11:00h, com analisador IRGA em cinco estádios de desenvolvimento: 1ª medição, 46° DAP (estádio vegetativo); 2ª medição, 53° DAP (pré-floração); 3ª medição, 62° DAP (floração); 4ª medição, 77° DAP (formação das vagens); e 5ª medição, 96° DAP (enchimento dos grãos). A configuração do IRGA durante as avaliações foram as mesmas utilizadas na determinação da curva de luz sendo utilizada a densidade de fluxo de fótons correspondente ao ponto de saturação luminoso.

As aclimações fotossintética e estomática foram determinadas a partir das medições das taxas fotossintéticas e estomáticas entre as 2ª e 5ª medições, em que as medições das trocas gasosas das plantas cultivadas sob alta  $[\text{CO}_2]$  foram realizadas em  $[\text{CO}_2]$  ambiente, e nas plantas cultivadas sob  $[\text{CO}_2]$  ambiente foram realizadas em alta  $[\text{CO}_2]$ . As medições foram realizadas no período entre 8:00

e 11:00 da manhã. Em cada folha fez-se a medição com no mínimo de 20 repetições totalizando 10 minutos por folha.

A eficiência instantânea do uso da água (*WUE*) foliar foi determinada pela razão entre *A<sub>max</sub>* e *E* (Larcher, 2006).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições (blocos). Os tratamentos constituíram as [CO<sub>2</sub>]: T1 - plantas cultivadas com 700 ppm de CO<sub>2</sub>; e T2 - plantas cultivadas com 380 ppm de CO<sub>2</sub> (concentração do ambiente). Os dados foram analisados com auxílio do pacote estatístico SAS 9.3 (SAS, 2011) para normalidade de erros, homogeneidade de variâncias. A análise de variâncias foi realizada pelo teste de F ( $p < 0,05$ ) e a discriminação de medias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 SATURAÇÃO DE LUZ

O ponto de saturação máximo de luz (*Q<sub>sat</sub>*) pelas folhas foi em torno de 950  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para as plantas cultivadas à [CO<sub>2</sub>] ambiente (T1) (Figura 2). Enquanto para as plantas cultivadas à alta [CO<sub>2</sub>], o ponto de saturação em torno de 1.650  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Figura 3). Desta forma, para uma questão de padronização, as medições de trocas gasosas foram realizadas com radiação de aproximadamente 1.650  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , visto que o aumento densidade de fluxo de fótons não altera a taxa fotossintética das as plantas cultivadas em [CO<sub>2</sub>] ambiente.

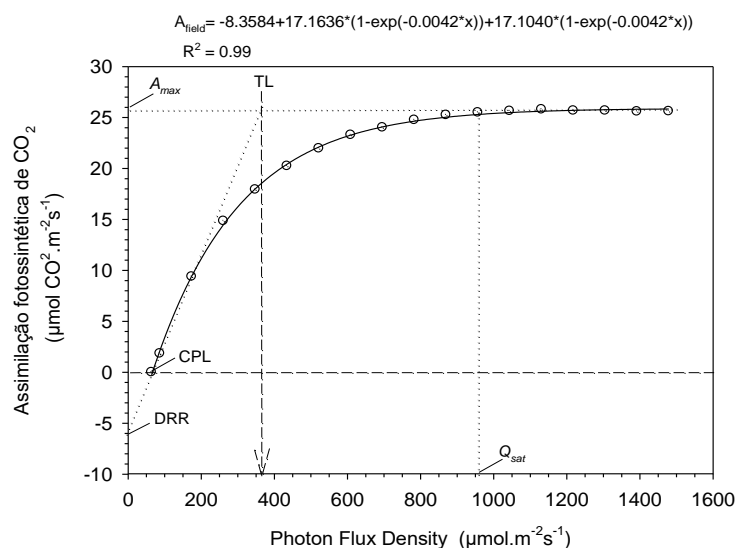


Figura 2. Curva de saturação de luz (*Q*) para determinar a taxa fotossintética máxima (*A<sub>max</sub>*) nas plantas cultivadas sob [CO<sub>2</sub>] ambiente e curva ajustada aos dados observados. Em que: *Q<sub>sat</sub>* é o ponto de saturação de luz na qual a taxa fotossintética é máxima (*A<sub>max</sub>*); CPL é o ponto de compensação de luz para a atividade fotossintética; e DRR é a taxa de respiração no escuro.



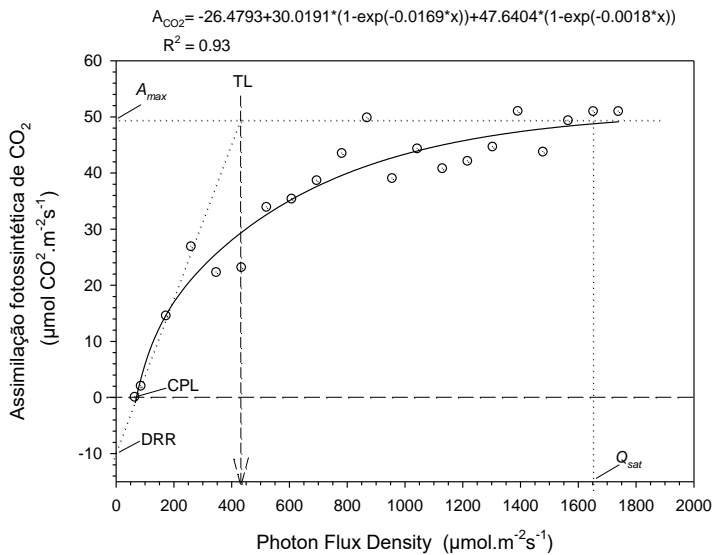


Figura 3. Curva de saturação de luz (Q) para determinar a taxa fotossintética máxima ( $A_{max}$ ) nas plantas cultivadas sob alta  $[CO_2]$  e curva ajustada aos dados observados. Em que:  $Q_{sat}$  é o ponto de saturação de luz na qual a taxa fotossintética é máxima ( $A_{max}$ ); CPL é o ponto de compensação de luz para a atividade fotossintética; e DRR é a taxa de respiração no escuro.

Este aumento nas propriedades fotossintéticas das folhas sob elevado  $CO_2$  é coerente com a resposta esperada em folhas de espécies C3 (Herrick & Thomas, 1999; Taiz e Zieger, 2006). A relação entre a radiação e as propriedades fotossintéticas das folhas fornecem valiosa informação sobre as adaptações ao ambiente (Taiz e Zeiger, 2006), e podem ajudar a explicar as propriedades constantes entre plantas sob condições ambientais diferentes, como as variações nas concentrações de  $CO_2$ .

Na curva de resposta a luz sob elevadas  $[CO_2]$  pode apreciar-se maiores valores do ponto de compensação das folhas (CPL) e valores mais negativos de respiração no escuro (DRR), pois uma maior taxa fotossintética líquida é necessária para atingir taxas positivas de absorção de  $CO_2$  em valores maiores de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e  $Q_{sat}$  (Figura 3).

### 3.2 TROCA GASOSAS

Nas medições das taxas fotossintéticas máximas ( $A_{max}$ ) foram observados incrementos em média de 60% nas plantas sob alta  $[CO_2]$ , 700 ppm (Figura 4), similar aos 59% encontrados por Ainsworth et al. (2002), e maiores aos encontrados por Bernacchi et al. (2005) e Lee et al. (2011), que relataram incrementos em média de 39% para a soja sob  $[CO_2]$  à 500 ppm. O incremento na taxa fotossintética das plantas do presente trabalho foi resultante do aumento no gradiente da  $[CO_2]$  entre o ambiente e a folha, provavelmente devido à maior  $[CO_2]$  no ambiente, elevando a disponibilidade de  $CO_2$  no sítio de carboxilação da Rubisco, o que, conseqüentemente, limitou mais a fotorrespiração como indicado anteriormente por Taiz e Zieger (2006). A maior  $[CO_2]$  no ambiente provocou também redução nas taxas de transpiração ( $E$ ) nas plantas sob alta  $[CO_2]$ , em média 21% de redução (Figura 4). Em vista deste incremento na taxa fotossintética máxima ( $A_{max}$ ) e redução da transpiração ( $E$ ) nas

plantas sob alta  $[CO_2]$ , estas apresentaram concomitantemente aumento na eficiência no uso da água ( $WUE$ ), em média 108%. A condutância estomática ( $g_s$ ) apresentou redução em média em torno de 15%, redução menor ao 40% das observações de Griffin & Luo (1999), Ainsworth et al. (2002), Ainsworth & Rogers (2007) e Lee et al. (2011).

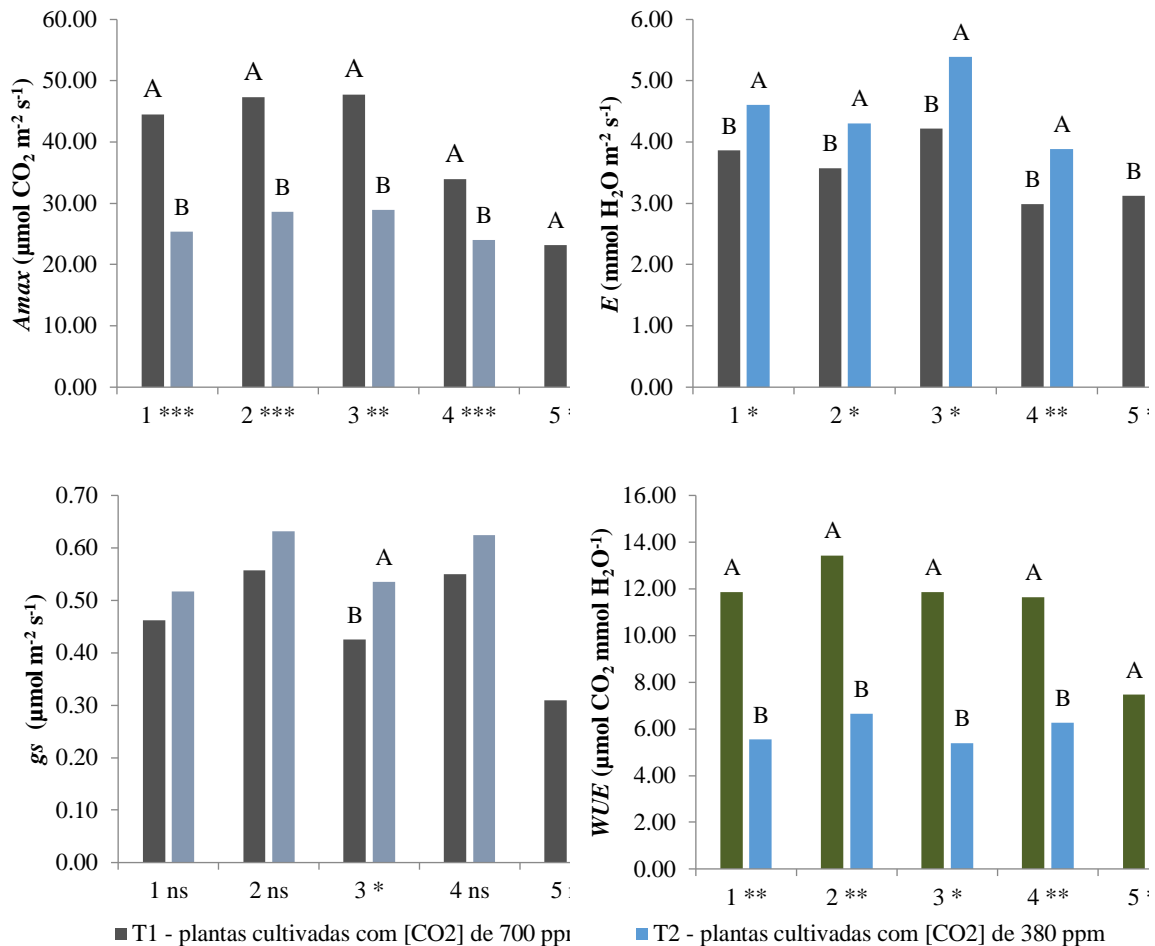


Figura 4. Medições das cinco medições de trocas gasosas (2ª à 5ª) utilizando como  $[CO_2]$  de referência as  $[CO_2]$  de cada tratamento. Em que:  $A_{max}$  - taxa fotossintética máxima foliar,  $E$  - taxa de transpiração;  $g_s$  - condutância estomática; e  $WUE$  - eficiência do uso da água. T1= plantas cultivadas à  $[CO_2]$  de 700 ppm; e T2= plantas cultivadas a  $[CO_2]$  ambiente. 1, 2, 3, 4 e 5 correspondem a 46, 53, 62, 77 e 96 dias após o plantio (DAP). Discriminação de médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Barras com as mesmas letras não diferem. Diferenças entre as datas de avaliação são caracterizadas por, \* significativo a  $p < 0,05$ ; \*\* significativo a  $p < 0,01$ ; \*\*\* significativo  $p < 0,001$ ; e ns - não significativo a  $p < 0,05$ .

Para as medições das trocas gasosas realizadas com a  $[CO_2]$  de referência do ambiente ( $\sim 380$  ppm) (Figura 5), a taxa fotossintética das plantas de T1, cultivadas em alta  $[CO_2]$ , foram menores (em média 25%) do que nas plantas de T2, cultivadas sob  $[CO_2]$  ambiente. Estas menores taxas fotossintéticas ( $A_{max}$ ) de T1 foram decorrentes do ajuste fisiológico da planta a aclimação



fotossintética a alta  $[CO_2]$  como descrito por Ainsworth et al. (2002). A diferença de 25% entre as plantas de T1 e T2 foram próximas às encontradas por Lee et al. (2011), 22,5%. Na taxa transpiratória ( $E$ ) não foi encontrada variação significativa entre os tratamentos. As plantas do T1 continuaram a apresentar menores valores de  $E$  em relação a T2 (Figura 4), porém esta diferença na redução diminuiu de 21% (Figura 4) para 14%, quando as plantas cultivadas em elevada  $[CO_2]$  foram submetidas a  $[CO_2]$  ambiente (Figura 5). A eficiência no uso da água ( $WUE$ ) reduziu, pois, as plantas de T2, cultivadas com  $[CO_2]$  ambiente, apresentaram maior eficiência no uso da água (em média de 14%) do que as plantas de T1, cultivadas com alta  $[CO_2]$ . Esta redução da  $WUE$  é em virtude, principalmente, da queda da taxa fotossintética das plantas de T1, em exposição de  $[CO_2]$  ambiente. Diferente das medições com a  $[CO_2]$  referente a cada tratamento (Figura 4), as medições da condutância estomática ( $g_s$ ) com a  $[CO_2]$  de referência de 380 ppm, provocou maior redução estomática, em média 20%, porém as plantas de T1 continuaram a apresentar menores valores, o que denota que não ocorreu aclimatação estomática nestas plantas. A aclimatação estomática, segundo Bunce (2001, 2008), não ocorre necessariamente concomitantemente com aclimatação fotossintética.

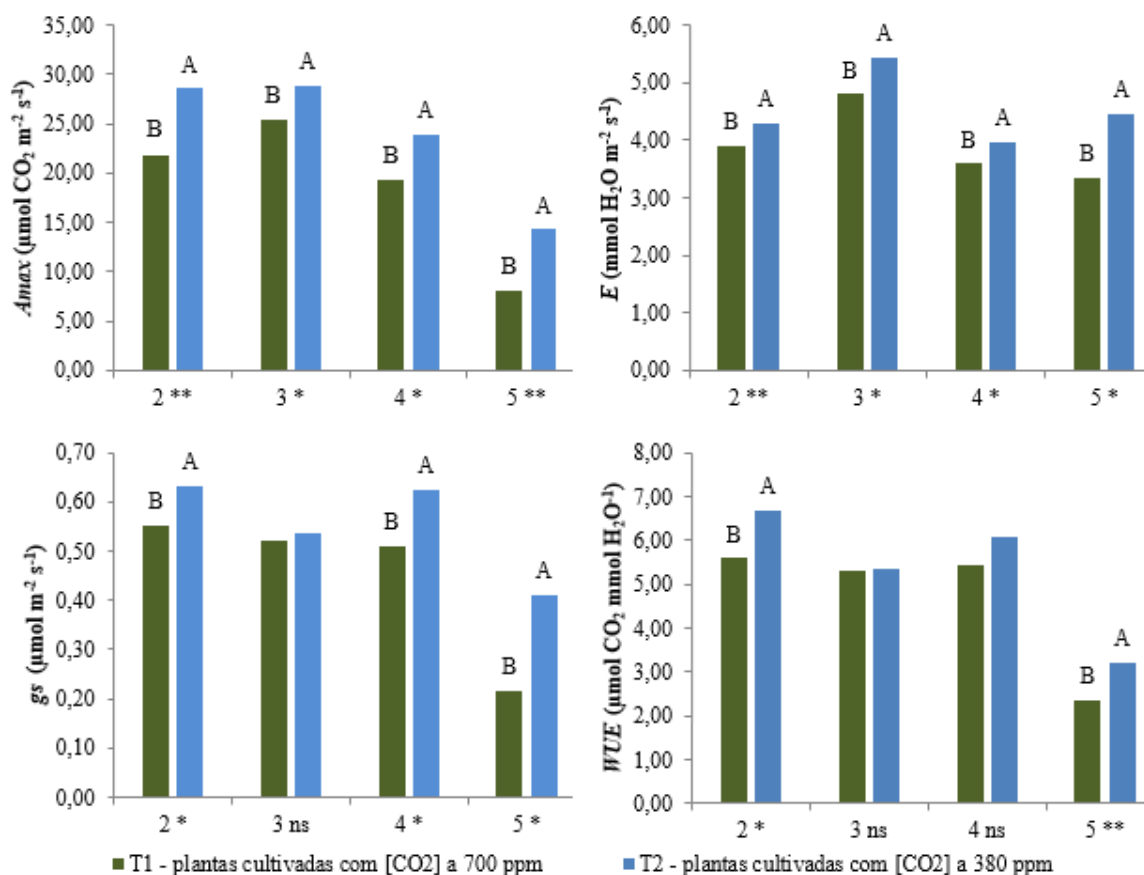


Figura 5. Médias de quatro medições de trocas gasosas (2ª à 5ª) utilizando como  $[CO_2]$  de referência na  $[CO_2]$  380 ppm (ambiente) para todos os tratamentos T1 e T2. Em que:  $A_{max}$  - taxa fotossintética máxima foliar,  $E$  - taxa de transpiração;  $g_s$  - condutância estomática; e  $WUE$  - eficiência do uso da água. T1= plantas cultivadas à  $[CO_2]$  de 700 ppm; e T2= plantas cultivadas a  $[CO_2]$  ambiente. Medições 2, 3, 4 e 5 correspondem a 53, 62, 77 e

96 dias após o plantio (DAP). Discriminação de médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Barras com as mesmas letras não diferem. Diferenças entre as datas de avaliação são caracterizadas por, \* significativo a  $p < 0,05$ ; \*\* significativo a  $p < 0,01$ ; \*\*\* significativo a  $p < 0,001$ ; e ns - não significativo a  $p < 0,05$ .

Nas medições das trocas gasosas realizadas com a  $[CO_2]$  de referência de 700 ppm (Figura 6), a taxa fotossintética ( $A_{max}$ ) das plantas de T1 (cultivadas em alta  $[CO_2]$ ) foram menores nas duas últimas medições (4ª e 5ª), em média 16%, em relação as plantas de T2 (cultivadas em  $[CO_2]$  ambiente). Esta redução, com a  $[CO_2]$  a 700 ppm, denota ainda mais a ocorrência da aclimação fotossintética causada pelo longo tempo de exposição das plantas a alta  $[CO_2]$ , corroborando com as observações de Lee et al. (2011). A taxa de transpiração ( $E$ ) apresentou diferenças somente nas duas últimas medições (4ª e 5ª), em que as plantas de T1 apresentaram menores valores em relação às plantas de T2, em média 20%, não apresentando grandes distinções entre as medições com as outras  $[CO_2]$  de referência. A eficiência do uso da água ( $WUE$ ) pelas plantas não apresentou diferenças entre os tratamentos, contudo nota-se uma redução gradual na  $WUE$  nas plantas sob esta atmosfera enriquecida com  $[CO_2]$  para ambos os tratamentos (Figura 6). Esta evidência na queda da  $WUE$  denota, além da aclimação fotossintética, o decréscimo da taxa fotossintética ( $A_{max}$ ) pelo longo tempo de exposição das plantas a alta  $[CO_2]$ , principalmente nas duas últimas medições (4ª e 5ª). A condutância estomática ( $g_s$ ) apresentou diferença somente na última medição, com menores valores de T1 em relação a T2, 33%. Como T1 ainda apresentou os menores valores de  $g_s$ , nota-se que não ocorreu aclimação estomática.

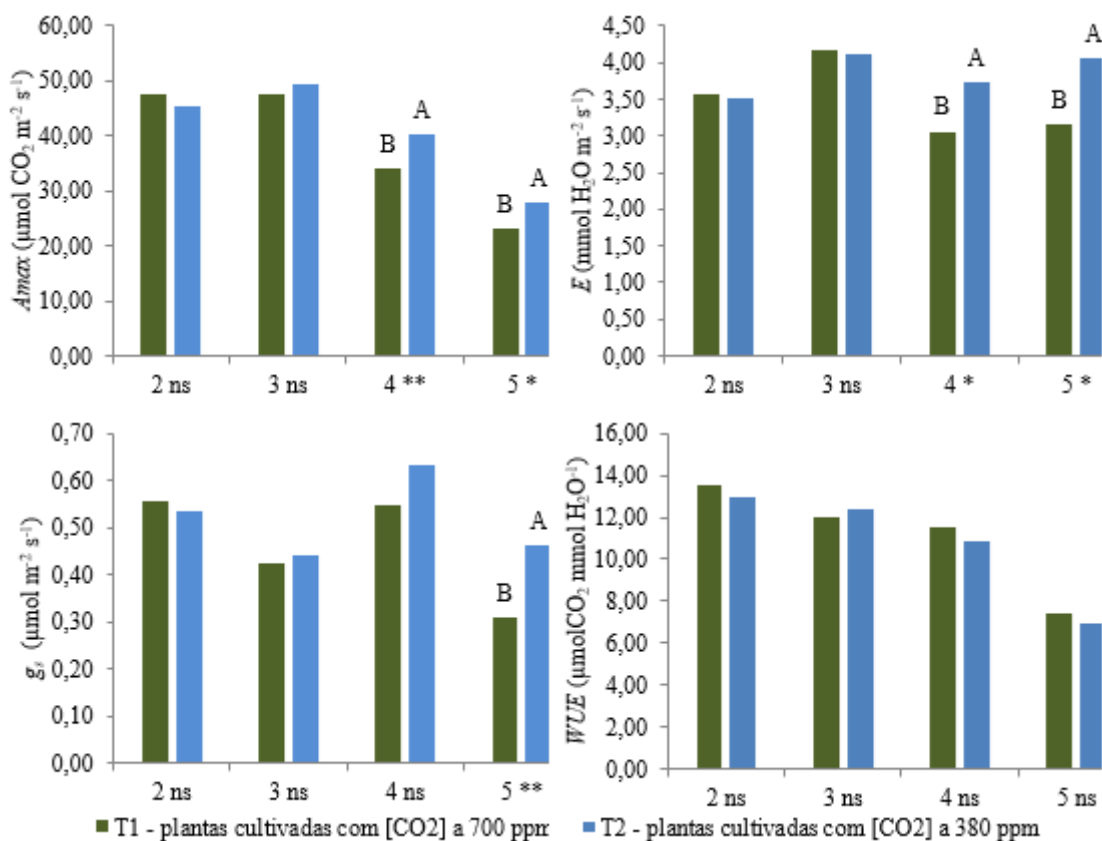


Figura 6. Médias de quatro medições de trocas gasosas (2ª à 5ª) utilizando como [CO<sub>2</sub>] de referência na [CO<sub>2</sub>] 700 ppm (elevada) para todos os tratamentos T1 e T2. Em que: *Amax* - taxa fotossintética máxima foliar, *E* - taxa de transpiração; *gs* - condutância estomática; e *WUE* - eficiência do uso da água. T1= plantas cultivadas à [CO<sub>2</sub>] de 700 ppm; e T2= plantas cultivadas a [CO<sub>2</sub>] ambiente. Medições 2, 3, 4 e 5 correspondem a 53, 62, 77 e 96 dias após o plantio (DAP). Discriminação de médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Barras com as mesmas letras não diferem. Diferenças entre as datas de avaliação são caracterizadas por, \* significativo a  $p < 0,05$ ; \*\* significativo a  $p < 0,01$ ; \*\*\* significativo a  $p < 0,001$ ; e ns - não significativo a  $p < 0,05$ .

Com o aumento na [CO<sub>2</sub>], muitas culturas podem ser afetadas positiva ou negativamente. A fotossíntese líquida e a produção quântica são bons indicadores de aclimatação da planta a níveis elevados de CO<sub>2</sub>. A noção de eficiência fotossintética na literatura envolve alguns termos diferentes, incluindo taxa fotossintética, rendimento quântico de assimilação de carbono e eficiência fotoquímica do Fotossistema II, que é frequentemente expressa como uma razão de variável para fluorescência máxima (Xu e Shen, 2000). Esses termos são diferentes, mas estão ligados entre si. Tanto a taxa fotossintética como a produção quântica estão relacionadas às características da folha, célula e cloroplasto em si e às condições ambientais. A taxa fotossintética é frequentemente expressa como o número de moléculas de CO<sub>2</sub> fixadas ou O<sub>2</sub> liberadas por unidade de área foliar por unidade de tempo, enquanto o rendimento quântico é expresso como o número de moléculas de CO<sub>2</sub> fixadas ou O<sub>2</sub> liberadas por fóton absorvido. A eficiência da fotossíntese de toda a planta é crucial para a agricultura, pois trata-se de analisar a produtividade de alimentos, combustíveis e outros produtos oriundos das plantas. A qualidade e quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (PAR), temperatura, disponibilidade de água, disponibilidade e utilização de nutrientes minerais e presença de poluentes na atmosfera e no solo (metais pesados); afetam a produtividade da planta, assim, como esses fatores interagem com o ambiente em mudança é agora objeto de muita pesquisa prática e básica na área de mudanças climáticas.

#### 4 CONCLUSÕES

A cultivar de soja estuda (Valiosa) apresenta incrementos na taxa fotossintética e na eficiência do uso da água, como também redução na taxa de transpiração em atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub>. Porém, em contrapartida, devido ao longo de tempo de exposição à alta [CO<sub>2</sub>] as plantas apresentam aclimação fotossintética, porém não apresentam aclimação estomática.

#### REFERÊNCIAS

Ainsworth, E. A.; Davey, P. A.; Bernacchi, C. J.; Dermody, O. C.; Heaton, E. A.; Moore, D. J.; Morgan, P. B.; Naidu, S. L.; Ra, H. Y.; Zhu, X.; Curtis, P. S.; Long, S. P. A meta-analysis

of elevated [CO<sub>2</sub>] effects on soybean (*Glycine max*) physiology, growth and yield. *Global Change Biology*, v. 8 n. 8, p. 695-709, 2002. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2002.00498.x

Ainsworth, E. A.; Davey, P. D.; Hymus, G. J.; et al. Is stimulation of leaf photosynthesis by elevated carbon dioxide concentration maintained in the long term? A test with *Lolium perenne* grown for ten years at two nitrogen levels under Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE). *Plant, Cell & Environment*, v. 26, p. 705-714, 2003.

Ainsworth, E. A.; Long, S. P. What have we learned from 15 years of free air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO<sub>2</sub>. *New Phytologist*, v. 165, p. 351-372, 2005.

Ainsworth, E. A.; Rogers, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO<sub>2</sub>]: mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell and Environment*, v. 30, p. 258-270, 2007.

Bernacchi, C. J.; Morgan, P. B.; Ort, D. R.; Long, S. The growth of soybean under free air [CO<sub>2</sub>] enrichment (FACE) stimulates photosynthesis while decreasing in vivo Rubisco capacity. *Planta*, v. 220, n. 3, p. 434-446, 2005. DOI: 10.1007/s00425-004-1320-8.

Bunce, J. A. Direct and acclamatory responses of stomatal conductance to elevated carbon dioxide in four herbaceous crop species in the field. *Global Change Biology*, v. 7, p. 323-331, 2001.

Bunce, J. A. Contrasting responses of seed yield to elevated carbon dioxide under field conditions within *Phaseolus Vulgaris*. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 128, p. 219-224, 2008.

Costa, A. C. *Respostas fisiológicas de duas linhagens de soja à atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub> e à restrição hídrica*. Viçosa, MG: UFV, 2003, 36f. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

Crous, K. Y.; Reich, P. B.; Hunter, M. D.; Ellsworth, D. S. Maintenance of leaf N controls the CO<sub>2</sub> response of grassland species exposed to nine years of free-air CO<sub>2</sub> enrichment. *Global Change Biology*, v. 16, p. 2076-2088, 2010.

Ellsworth, D. S.; Reich, P. B.; Naumburg, E. S.; Koch, G. W.; Kubiske, M.; Smith, S. Photosynthesis, carboxylation and leaf nitrogen responses of 16 species to elevated pCO<sub>2</sub> across four free-air CO<sub>2</sub> enrichment experiments in forest, grassland and desert. *Global Change Biology*, v. 10, p. 2121-2138, 2004.

Griffin, K. L.; Luo, Y. Sensitivity and acclimation of *Glycine max* (L.) Merr. Leaf gas exchange to CO<sub>2</sub> partial pressure. *Environmental Experimental Botany*, v. 42, p. 141-153, 1999.

Isopp, H.; Frehner, M.; Almeida, J. P. F.; et al. Nitrogen plays a major role in leaves when source-sink relations change: C and N metabolism in *Lolium perenne* growing under free air CO<sub>2</sub> enrichment. *Australian Journal of Plant Physiology*, v. 27, p. 851-858, 2000.

Jifon, J. L.; Wolfe, D. W. Photosynthetic acclimation to elevated CO<sub>2</sub> in *Phaseolus vulgaris* L. is altered by growth response to nitrogen supply. *Global Change Biology*, v.8, p.1018–1027, 2002.

Kubiske, M.E. and Pregitzer K.S. Effects of elevated CO<sub>2</sub> and light availability on the photosynthetic response of trees of contrasting shade tolerance. *Tree Physiol.* 16:351-358. 1996.

Lambreva, M.; Stoyanova-Koleva, D.; Baldjiev, G.; Tsonev, T. Early acclimation changes in the photosynthetic apparatus of bean plants during short-term exposure to elevated CO<sub>2</sub> concentration under high temperature and light intensity. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, nº 106, p.219–232, 2005.

Larcher, W. *Ecofisiologia Vegetal*. Tradução: Carlos Henrique Britto de Assis Prado. São Carlos: RiMa, 2006. 531p.

Leakey, A.D.; Bernacchi, C.J.; Ort, D.R.; Long, S.P. Long-term growth of soybean at elevated [CO<sub>2</sub>] does not cause acclimation of stomatal conductance under fully open-air conditions. *Plant Cell Environ.* v. 29, n. 9, p.1794-1800, 2006.

Lee, T. D.; Tjoelker, M. G.; Ellsworth, D. S.; Reich, P. B. Leaf gas exchange responses of 13 prairie grassland species to elevated CO<sub>2</sub> and increased nitrogen supply. *New Phytologist*, v. 150, p. 405-418, 2001.

Lee, T. D.; Barrott, S. H.; Reich, P. B. Photosynthetic responses of 13 grassland species across 11 years of free-air CO<sub>2</sub> enrichment is modest, consistent and independent of N supply. *Global Change Biology*, v. 17, p. 2893–2904, 2011. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02435.x

Mera, R.; Niyogi, D.; Bohl, G.; Wilkerson, G.; Semazzi, F. Potential individual versus simultaneous climate change effects on soybean (C<sub>3</sub>) and maize (C<sub>4</sub>) crops: an agrotechnology model based study. *Global Planet Change*, n° 54, p. 163–182, 2006.

Oliveira, L. J. C. *Mudanças climáticas e seus impactos nas produtividades das culturas do feijão e do milho no estado de Minas Gerais*. Viçosa, MG: UFV, 2007, 67f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

Pritchard, S. G.; Amthor, J. S. *Crops and environmental change: an introduction to effects of global warming, increasing atmospheric CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> concentrations, and soil salinization on crop physiology and yield*. Food Products Press, New York, USA, 2005, 421p.

Prior, S. A.; Rogers, H. H.; Sionit, N.; Patterson, R. P. Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on water relations of soya bean. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 35, p. 13 – 25, 1991.

Rogers, A.; Ainsworth, E. A. The response of foliar carbohydrates to elevated carbon dioxide concentration. In: Nosberger, J.; Long, S. P.; Norby, R. J.; Stitt, M.; Hendrey, G. R.; Blum, H. *Managed Ecosystems and CO<sub>2</sub>, Case Studies, Processes and Perspectives*. Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 2006, p. 308.

Rogers, A.; Ainsworth, E.; Leakey, A. D. B. Will elevated carbon dioxide concentration amplify the benefits of nitrogen fixation in legumes? *Plant Physiology*, v. 151, p. 1009–1016, 2009. DOI: 10.1104/pp.109.144113.

Rogers, A.; Humphreys, S. W. A mechanistic evaluation photosynthetic acclimation at elevated CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology*, v. 6, p. 1005-1012, 2000.

Sas. *User's guide*. Versão 9.3. Cary: SAS Institute Inc., 2011.

Silva, J. B. L.; Ferreira, P. A.; Pereira, E. G.; Costa, L. C.; Miranda, G. V. Development of experimental structure and influence of high CO<sub>2</sub> concentration in maize crop. *Engenharia Agrícola*, v. 32, n. 2, p. 306-314, 2012.



## **Brazilian Journal of Development**

Ziska, L. H.; Bunce, J. A. Plant responses to rising atmospheric carbon dioxide. In: Morison, J.; Morecroft, M. *Plant growth and climate change*. Blackwell Publis