

JOÃO BATISTA LOPES DA SILVA

**RESPOSTAS DAS CULTURAS DE FEIJÃO SUBMETIDO AO ESTRESSE HÍDRICO  
E DE MILHO EM ATMOSFERA ENRIQUECIDA COM CO<sub>2</sub>**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2010


JOÃO BATISTA LOPES DA SILVA

**RESPOSTAS DAS CULTURAS DE FEIJÃO SUBMETIDO AO ESTRESSE HÍDRICO  
E DE MILHO EM ATMOSFERA ENRIQUECIDA COM CO<sub>2</sub>**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 09 de julho de 2010

---



Eduardo Gusmão Pereira

---



Flávio Barbosa Justino

---



Rubens Alves de Oliveira

---



João Carlos Ferreira Borges Júnior

---



Paulo Afonso Ferreira  
(Orientador)

*É um erro capital teorizar antes de ter os dados. Insensivelmente, começa-se a distorcer os fatos para adaptá-los às teorias, em vez de fazer que as teorias adaptem aos fatos.*  
*Sherlock Holmes, em A scandal in Bohemia, de Conan Doyle (1891)*

*A compreensão humana não é um exame desinteressado, mas recebe infusões da vontade e dos afetos; disso se originam ciências que podem ser chamadas “ciências conforme a nossa vontade”. Pois um homem acredita mais facilmente no que gostaria que fosse verdade. Assim, ele rejeita coisas difíceis pela impaciência de pesquisar; coisas sensatas, porque diminuem a esperança; as coisas mais profundas da natureza, por superstição; a luz da experiência, por arrogância e orgulho; coisas que não são comumente aceitas, por deferência à opinião do vulgo. Em suma, inúmeras são as maneiras, e às vezes imperceptíveis, pelas quais os afetos colorem e contaminam o entendimento.*  
*Francis Bacon, Novum organon (1620)*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter criado a maravilha que é viver.

Aos meus pais, José Aymoré e Eva Inês, por terem me ensinado o respeito, a educação, a honestidade e, acima de tudo, por me amarem.

À minha irmã Nádia lacy, pelo apoio e conselhos nas horas difíceis.

À Luanna, que me incentivou e ajudou, mas acima de tudo me acalmou nas horas difíceis. Meu eterno amor por ti.

Ao professor Paulo Afonso que, além de um grande orientador, foi um segundo pai, ou “paf” como ele próprio diz. Espero ter sido o “filho” caçula científico que ele sempre quis ter.

Aos professores Luís Claudio Costa, Marco Oliva Cano, Glauco Vieira Miranda e José Eustáquio de Souza Carneiro, pelos conselhos durante a realização deste trabalho.

Aos amigos e estagiários Eduardo Gusmão, Júlia Weiler, Cássio Sitta, Vitor Martins, Santiago Matavelli, Rogério e Ciro, cuja colaboração foi fundamental para a realização deste trabalho.

Ao Zé Maurício, Irrizom, Pernalonga, Sebastião e Aluísio, pela ajuda na confecção das câmaras e na montagem do experimento.

Aos amigos da república e de curso Danilo, André, Felipe e Marcelo, pela ajuda durante o experimento, pelo companheirismo e amizade. Nossa amizade nunca se apagará.

À Universidade Federal de Viçosa, por meio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À FAPEMIG, pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa e à CAPES e CNPq pela concessão das bolsas de estudo.

Também aos professores e funcionários do DEA que, além de me ajudar, também me ensinaram.

Aos amigos do DER-ES, Eduardo Manato, Élvio Sartori, Thiago Loureiro, Ivo Macina, Fernando Pimentel, Rodolfo e Neto, pela ajuda e tempo concedido no término do trabalho.

Enfim, a todos os amigos e colaboradores que, direta ou indiretamente, contribuíram para o sucesso deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

JOÃO BATISTA LOPES DA SILVA, filho de José Aymoré Lopes da Silva e Eva Inês Camilotti Lopes da Silva, nasceu no dia 11 de setembro de 1981, em Amparo, Estado de São Paulo.

No primeiro semestre de 1999, ingressou na Universidade Federal de Viçosa, concluindo o Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental em julho de 2004.

Em agosto de 2004, iniciou o curso de mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, defendendo dissertação em setembro de 2006.

Em outubro de 2006, iniciou o curso de doutorado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da tese em julho de 2010.

## ÍNDICE

RESUMO.....	vii
ABSTRACT .....	ix
OBJETIVOS GERAIS.....	2
Objetivos específicos .....	2
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	3
CAPÍTULO 1. Desenvolvimento de estrutura experimental e influências de duas concentrações de CO <sub>2</sub> na cultura do milho ( <i>Zea mays</i> L.) .....	4
1.1. INTRODUÇÃO .....	4
1.2. OBJETIVOS .....	6
1.3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	6
1.3.1. Estrutura física .....	6
1.3.1.1. Desenvolvimento das câmaras de topo aberto.....	7
1.3.1.2. Sistema de irrigação .....	9
1.3.2. Solo e adubação .....	9
1.3.3. Material vegetal.....	10
1.3.4. Dados coletados.....	10
1.3.5. Delineamento experimental.....	12
1.3.5.1. Delineamento experimental para o desempenho das câmaras de topo aberto .....	13
1.3.6. Análise estatística .....	13
1.3.7. Cronograma das atividades do experimento .....	14
1.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	14
1.4.1. Câmaras de topo aberto desenvolvidas e variáveis ambientais.....	14
1.4.2. Taxa fotossintética .....	17
1.4.3. Variáveis fenológicas.....	19
1.5. CONCLUSÕES .....	21
1.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	22
CAPÍTULO 2. Influências de duas concentrações de CO <sub>2</sub> e da disponibilidade hídrica na cultura do feijão ( <i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....	25
2.1. INTRODUÇÃO .....	25
2.2. OBJETIVOS .....	27
2.3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	27
2.3.1. Estrutura física .....	28
2.3.1.1. Câmaras de topo aberto.....	28
2.3.1.2. Sistema de irrigação .....	30

2.3.2. Solo e adubação .....	30
2.3.3. Material vegetal .....	30
2.3.4. Dados coletados.....	31
2.3.5. Delineamento experimental.....	32
2.3.6. Análise estatística .....	34
2.3.7. Cronograma das atividades do experimento .....	34
2.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
2.4.1. Variáveis ambientais .....	34
2.4.2. Variáveis fisiológicas .....	36
2.4.3. Variáveis fenológicas.....	40
2.5. CONCLUSÕES .....	47
2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
CONCLUSÕES GERAIS .....	51
RECOMENDAÇÕES .....	51

## RESUMO

SILVA, João Batista Lopes da, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, Julho, 2010.  
**Respostas das culturas de feijão submetido ao estresse hídrico e de milho em atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub>.** Orientador: Paulo Afonso Ferreira.  
Coorientadores: Luís Claudio Costa e Marco Antonio Oliva Cano.

O aumento da [CO<sub>2</sub>] apresenta resultados diversos nas plantas de forma direta e indireta, sendo que os efeitos benéficos no crescimento das plantas dependem também de seu estado hídrico. Desta forma, neste trabalho objetivou-se analisar e quantificar a taxa fotossintética e a produtividade sob alta [CO<sub>2</sub>] nas culturas de milho (*Zea mays* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) submetido a estresse hídrico. Os experimentos foram conduzidos na Infraestrutura de Pesquisa em Estresse Hídrico e Salino da Universidade Federal de Viçosa, com o milho no período entre outubro de 2008 a março de 2009 e o feijão entre abril a julho de 2009. Para enriquecer o ar com CO<sub>2</sub>, foram utilizadas câmaras de topo aberto, enquanto o estresse hídrico foi aplicado somente na cultura do feijão, iniciando antes da fase da floração e finalizando no início da maturação, perdurando 40 dias. Utilizou-se a cultivar de milho AG9010 (Agrocere), enquanto a de feijão foi a Majestoso (UFV). Foram realizadas medições da taxa fotossintética e, ao final dos ciclos das culturas, foram determinadas as produções de grãos e matéria seca da parte aérea das plantas. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições (blocos) para ambas culturas. Para o feijão, entretanto, as parcelas foram divididas em subparcelas para aplicação do estresse hídrico. As parcelas, utilizadas para o milho e feijão, receberam o tratamento primário (P): P1 – plantas cultivadas em câmaras de topo aberto à [CO<sub>2</sub>] de 700ppm; P2 – plantas cultivadas em câmaras de topo aberto com [CO<sub>2</sub>] ambiente; e P3 - testemunha. As subparcelas, utilizadas somente para o feijão, receberam o tratamento secundário (S): S1 – testemunha; e S2 – estresse hídrico. Os resultados foram submetidos à análise de variância (Anova) e ao teste de Tukey a 5% de probabilidade. Todas as medições da taxa fotossintética ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) apresentaram diferença significativa somente para a parcela (P), com incrementos nas taxas fotossintéticas em P1, entre 27,73 a 32,02% para o milho e 12,50 a 69,59% para o feijão. As menores taxas fotossintéticas (-51,44%) foram encontradas nas plantas de feijão submetidas ao estresse hídrico (P2S2). Também foi observada na cultura do feijão aclimação fotossintética em P1 e P2, enquanto o milho não apresentou aclimação. Para o milho, o peso total dos grãos (g) e a matéria seca da parte aérea (g) não apresentaram incrementos para P1, apesar das maiores taxas fotossintéticas. Para o feijão, o peso total dos grãos (g) não apresentou incremento para P1S1, verificando-se somente

redução no peso total dos grãos para os tratamentos submetidos ao estresse hídrico. Quanto à matéria seca do feijão, apresentou incrementos de 20,88% para P1 e reduções de -34,27% para as subparcelas com estresse hídrico, (P2S2). Ambas as culturas apresentaram maiores taxas fotossintéticas em altas [CO<sub>2</sub>], com maior resposta para o feijão. Em ambas as culturas não há aumento no peso total dos grãos, apesar de altas taxas fotossintéticas. O aumento da [CO<sub>2</sub>] proporciona aumento da matéria seca da parte aérea somente na cultura do feijão.

## ABSTRACT

SILVA, João Batista Lopes da, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2010.  
**Crops answer of beans subjected to water stress and corn in an atmosphere enriched with CO<sub>2</sub>.** Adviser: Paulo Afonso Ferreira. Co-advisors: Luís Claudio Costa and Marco Antonio Oliva Cano.

The increase of the [CO<sub>2</sub>] shows several direct and indirect results in plants, whereas the beneficial effects on the growth of the plants also depend on their hydric state. So, this work was carried out to analyze and quantify the photosynthetic rate and the productivity under high [CO<sub>2</sub>] in the maize (*Zea mays* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris* L.) crops subjected to hydric stress. The experiments were conducted in the Infraestrutura de Pesquisa em Estresse Hídrico and Salino pertaining to the Universidade Federal de Viçosa, by using the maize during the period from October 2008 to March 2009 and the bean from April to July 2009. To enrich the air with CO<sub>2</sub>, top-open chambers were used, whereas the hydric stress was applied on the bean crop only, by beginning before the flowering phase and concluding at the beginning of maturation, as lasting for 40 days. The maize cultivar AG9010 (Agrocere) was used, whereas the bean one was the Majestoso (UFV). The photosynthetic rate measurements were accomplished and the yield of the grains and dry matter of the plant aerial part were determined at the end of the crop cycles. The randomized block experimental design was used, with four replicates (blocks) for both crops. For bean, however, the plots were divided into subplots for application of the hydric stress. Those plots used for maize and bean were given the primary treatment (P): P1 - plants cropped in top-open chambers at 700ppm [CO<sub>2</sub>]; P2 - plants cropped in top-open chambers with environmental [CO<sub>2</sub>]; and P3 - control. Those subplots only used for bean were given the secondary treatment (S): S1 - control; and S2 – hydric stress. The results were subjected to variance analysis (Anova) and to Tukey test at 5% probability level. All measurements of the photosynthetic rate ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) showed significant difference only for plot (P), with increments of the photosynthetic rates in P1, between 27.73 to 32.02% for maize and 12.50 to 69.59% for bean. The lowest photosynthetic rates (-51.44%) were found in the bean plants submitted to hydric stress (P2S2). In the bean crop, the photosynthetic acclimatization was observed in P1 and P2, whereas the maize showed no acclimatization. For maize, the total weight of the grains (g) and the dry matter of the aerial part (g) presented no increments for P1 in spite of the highest photosynthetic rates. For bean, the total weight of the grains (g) presented no increment for P1S1, as only reduction in the total weight of the grains was verified for the treatments submitted to hydric stress. The dry matter of the bean presented

20.88% increments for P1 and -34.27% reductions for the subplots with hydric stress (P2S2). Both crops presented higher photosynthetic rates in high [CO<sub>2</sub>], with higher response for the bean. No increase in the total weight of the grain occurred in both crops, in spite of the high photosynthetic rates. The increase of the [CO<sub>2</sub>] provides increased dry matter of the aerial part only in the bean crop.

## INTRODUÇÃO GERAL

O efeito estufa é um dos fenômenos naturais responsáveis pela manutenção da vida no Planeta como a conhecemos hoje. Este fenômeno é promovido pela presença de gases como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o ozônio (O<sub>3</sub>), o metano (CH<sub>4</sub>) e o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), que juntamente com o vapor de água possuem a propriedade de absorver e refletir parte dos raios infravermelhos oriundos da superfície terrestre, contribuindo para o aquecimento da superfície da Terra, principalmente durante o período noturno. Estes gases são também conhecidos como gases do efeito estufa.

Apesar do benefício que este fenômeno propicia, atualmente ele tem sido visto de forma negativa, porque o aumento nas emissões dos gases de efeito estufa, em decorrência da ação antrópica, tem intensificado o fenômeno, podendo trazer consequências negativas ao meio ambiente (Souza, 2007). O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) ressalta que é evidente o aumento na temperatura média global do ar e do oceano, o derretimento das geleiras e o aumento no nível médio do mar, decorrentes do aumento do efeito estufa. Em escala continental e regional, numerosas mudanças no clima vem sendo observadas, tais como as mudanças nas temperaturas do Ártico, nos regimes de precipitação, na salinidade do oceano, nos padrões de vento e na ocorrência de eventos extremos com maior frequência e intensidade, incluindo secas, enchentes, ondas de calor e ciclones tropicais (IPCC, 2007a).

A principal hipótese para estas mudanças no clima está no aumento das emissões dos gases do efeito estufa, em destaque o CO<sub>2</sub>. Este aumento das emissões teve seu marco inicial no século XIX com o advento da revolução industrial. Houghton *et al.* (2001) ressaltam que a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera antes da revolução industrial era de 280ppm, mas agora atinge 360ppm. Entretanto, entre os anos de 1996 e 2001, a média anual de aumento nas concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera foi de 1,74ppm, mas entre 2002 e 2006 essa média subiu para 2,09ppm, atingindo a concentração de 384 ppm no ano de 2006 (Noaa, 2006). Além disso, algumas previsões indicam concentrações na ordem de 700ppm para a segunda metade do século XXI (Houghton *et al.*, 1996).

Este aumento na concentração dos gases do efeito estufa, em geral, poderá promover várias anomalias climáticas. Em razão de seus possíveis impactos, estas mudanças climáticas tornam países em desenvolvimento, de um modo geral, os mais vulneráveis (IPCC, 2001; Nobre, 2005). No caso do Brasil, o País se mostra especialmente vulnerável ao aquecimento global, quando são analisados os impactos sobre seus ecossistemas e sua agricultura (Nobre, 2005). Do ponto de vista biológico e agrícola, o aumento da temperatura poderá encurtar o ciclo das culturas e representar antecipações nas épocas de semeadura e colheita, ocorrendo também maiores riscos de salinização do solo, juntamente com incidências de pragas e ervas daninhas (Agostinnetto *et al.*, 2002).

A agricultura é uma atividade altamente dependente tanto de fatores climáticos, cujas alterações podem afetar a produtividade e o manejo das culturas, quanto de fatores sociais, econômicos e políticos. As condições de adaptação de estabelecimento dos sistemas agrícolas à mudança do clima podem ser bem variáveis, colocando-se em posições relativamente vulneráveis, em função de diferentes cenários climáticos (Embrapa, 2001). Amando e Reinert (1999), citado por Agostinnetto *et al.* (2002), advertem que em países de clima tropical, como é

o caso do Brasil, poderá haver redução de até 10% no potencial produtivo agrícola devido a maior evaporação da água e conseqüente estresse hídrico às plantas.

Considerando os efeitos das mudanças climáticas na agricultura, o IPCC (2007b) aponta que a produtividade das culturas pode aumentar, ligeiramente, para regiões de médias a altas latitudes com aumento da temperatura máxima do ar entre 1 a 3°C, dependendo da cultura. Para latitudes mais baixas, especialmente em regiões tropicais com estações secas e chuvosas bem definidas, é esperada a diminuição na produtividade das culturas para aumentos de temperatura do ar de 1 a 2°C, o que aumentaria o risco de escassez de alimentos. Globalmente, é esperado que o potencial agrícola se eleve com aumentos na temperatura média do ar em torno de 1 a 3°C; acima destes valores, acredita-se na diminuição. Outro agravante para a agricultura é o aumento na frequência de secas e inundações, o que pode afetar a produção agrícola negativamente, especialmente em regiões de subsistência em baixas latitudes.

Apesar dos efeitos negativos que as mudanças no clima podem acarretar para os sistemas agrícolas, existem efeitos positivos. O contínuo aumento da [CO<sub>2</sub>] atmosférica poderá afetar, ou mesmo já afeta, as culturas agrícolas de duas formas: (1) elevadas [CO<sub>2</sub>] inibem a fotorrespiração e estimula a fotossíntese em plantas C<sub>3</sub>, como o trigo, arroz, batata, soja e feijão; (2) elevadas [CO<sub>2</sub>] aumentam o uso eficiente da água em plantas do tipo C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub>, como o milho, sorgo e cana-de-açúcar (Pritchard e Amthor, 2005). Assim, estes efeitos benéficos podem resultar no aumento da produção de grãos e matéria seca das plantas. No entanto, é necessário estimar se estes efeitos irão prevalecer sobre os impactos negativos das mudanças do clima.

Dentro deste contexto, é de suma importância a quantificação das respostas das culturas às futuras condições climáticas, principalmente sob condições de estresse hídrico e aumento da [CO<sub>2</sub>] no ambiente.

## **OBJETIVOS GERAIS**

Neste trabalho, objetivou-se analisar, quantificar e comparar algumas das respostas fisiológicas e fenológicas, principalmente produtivas, de plantas do tipo C<sub>3</sub> (feijão) e C<sub>4</sub> (milho), sob atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub> e estresse hídrico.

### **Objetivos específicos**

- Desenvolver câmaras de topo aberto, para possibilitar a criação de ambiente enriquecido com CO<sub>2</sub>;
- Analisar e quantificar algumas respostas fisiológicas e fenológicas, principalmente produtivas, da cultura de milho (*Zea mays* L.) sob atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub>; e
- Analisar e quantificar algumas das respostas fisiológicas e fenológicas, principalmente produtivas, da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) sob atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub> e estresse hídrico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agostinetto, D.; Fleck, N. G.; Rizzardi, M. A.; Balbinot JR. Potencial de emissão de metano em lavouras de arroz irrigado. *Ciência Rural*, Santa Maria, Vol. 32, nº 6, p. 1073 – 1081, 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.br/>>. Acesso em: 24 out. 2006.
- Embrapa. *Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira*. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP, 2001, 397p.
- Houghton, J.T.; Miera Filho, L.G.; Callander, B.A.; Harris, N.; Kattenberg, A.; Maskell, K (eds.). *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1996, 73p. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 15 out. 2007.
- Houghton, J.T.; Ding, Y.; Griggs, D.J.; Nougier, M.; van der Linden, P.J.; Xiaosu, D. (eds.). Intergovernmental panel on climate change. In: *Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001, 881p. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 15 out. 2007.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2001: The scientific basis: summary for policymakers*. Cambridge University Press: Cambridge, 2001, 20p. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 14 jun. 2010.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press: Cambridge, 2007a, 18p. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 15 out. 2007.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press: Cambridge, 2007b, 23p. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 15 out. 2007.
- Noaa – *National Oceanic and Atmospheric Administration*, 2006. Disponível em: <<http://www.cmde.noaa.gov>>. Acesso em: 10 out. 2007.
- Nobre, C. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima. In: *Mudança do clima – Volume I, negociações internacionais sobre a mudança do clima*. Brasília, DF: Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, 2005, p. 147-216. (Cadernos NAE, 3).
- 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.
- Souza, A. P. *A cana-de-açúcar e as mudanças climáticas: efeitos de uma atmosfera enriquecida em CO<sub>2</sub> sobre o crescimento, desenvolvimento e metabolismo de carboidratos de Saccharum ssp.* Campinas, SP: UNICAMP, 2007, 91f. Dissertação (Mestrado em Biologia Celular), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2007.

## **CAPÍTULO 1. Desenvolvimento de estrutura experimental e influências de duas concentrações de CO<sub>2</sub> na cultura do milho (*Zea mays* L.)**

### **1.1. INTRODUÇÃO**

A concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera está aumentando cerca de 1ppm ao ano, principalmente devido à queima de combustíveis fósseis. A partir de 1958, quando começaram as medições sistemáticas de CO<sub>2</sub> em Mauna Loa, Havaí, as concentrações aumentaram mais de 17% e assim, em 2020, podem alcançar 600ppm (Taiz e Zeiger, 2004). Segundo Oliveira (2007), a concentração atual de CO<sub>2</sub> na atmosfera é um fator limitante para a fotossíntese, crescimento e produtividade de muitas espécies. 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 CO<sub>2</sub>, temperatura do ar e luz.

O aumento da [CO<sub>2</sub>] apresenta diversos resultados nas plantas, de formas diretas e indiretas. Os reflexos na fotossíntese deverão ser, em geral, positivos, embora as respostas possam variar entre as plantas. Na produção agrícola, os reflexos poderão ser positivos em decorrência da estimulação da fotossíntese, especialmente para plantas com metabolismo tipo C<sub>3</sub> (ex.: arroz, soja, feijão), assim como do melhoramento da eficiência de uso da água como resultado da redução da condutância estomática – fechamento parcial dos estômatos. No entanto, as plantas do tipo C<sub>4</sub> (ex.: milho, sorgo, cana-de-açúcar), por serem menos responsivas aos aumentos da [CO<sub>2</sub>], poderão sofrer efeitos supressivos por competição com ervas daninhas tipo C<sub>3</sub> (Siqueira *et al.*, 2001).

Em geral, concentrações de CO<sub>2</sub> acima do normal, 200 a 400ppm a mais, produzem estímulos no crescimento e na produção de plantas do tipo C<sub>3</sub>, mas não em tipo C<sub>4</sub>, porque aumentos da [CO<sub>2</sub>] tem pouco efeito nas taxas fotossintéticas das plantas C<sub>4</sub>, em razão do mecanismo que aumenta a [CO<sub>2</sub>] no sítio da Rubisco das plantas C<sub>4</sub> (Ziska e Bunce, 2006). Nas plantas C<sub>3</sub>, observam-se incrementos de 30 a 70% na taxa de assimilação do carbono, devido ao aumento de duas a três vezes na concentração atmosférica atual de CO<sub>2</sub>. Este efeito é devido, principalmente, à maior eficiência carboxilativa da Rubisco, devido à maior disponibilidade de CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, redução de 20 a 40% no processo fotorrespiratório. Em plantas C<sub>4</sub>, entretanto, o efeito de elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> sobre a produtividade apresentam, geralmente, menores incrementos, ou seja, em torno de 10% em comparação com as plantas C<sub>3</sub> (Griffin e Luo, 1999). Comparando C<sub>3</sub> x C<sub>4</sub> em elevada [CO<sub>2</sub>], Wand *et al.* (1999) também encontraram diferenças em assimilação fotossintética de 33 e 25%, respectivamente.

Embora o ganho de biomassa e a assimilação fotossintética tenha sido menor nas plantas C<sub>4</sub>, este não pode ser considerado insignificante. Por muito tempo acreditou-se que as plantas C<sub>4</sub> não responderiam ao aumento da [CO<sub>2</sub>] em função do mecanismo de concentração de CO<sub>2</sub> presente nas células da bainha vascular destas espécies, o que confere alta eficiência fotossintética às mesmas. Contudo, estudos mais recentes, como os conduzidos por Leakey *et al.* (2004) e Souza (2007), demonstram que plantas C<sub>4</sub> podem responder significativamente ao aumento da [CO<sub>2</sub>] e algumas até de forma semelhante às espécies C<sub>3</sub>.

Diversas especulações são feitas em torno dessas diferentes respostas das plantas C<sub>4</sub> em elevada [CO<sub>2</sub>], sendo que as respostas encontradas são normalmente atribuídas a três fatores: (1) algumas espécies C<sub>4</sub> podem estar saturadas às concentrações atuais de gás carbônico enquanto outras não; (2) o efeito pode ser devido à diminuição da condutância estomática decorrente do cultivo em alta [CO<sub>2</sub>], que pode reduzir a transpiração e melhorar o estado hídrico na planta; e (3) a diminuição da transpiração pode aumentar a temperatura foliar, proporcionando uma ótima temperatura para o processo fotossintético (Ghannoum *et al.*, 2000). Vale ressaltar que muitas respostas e detalhes dos mecanismos bioquímicos e celulares das plantas C<sub>4</sub> ao aumento da [CO<sub>2</sub>] ainda não são claros (Ziska e Bunce, 2006).

Por comparação entre estudos, Ziska e Bunce (2006) relatam que uma simples folha não é um bom indicativo para as respostas da fotossíntese e do crescimento da planta como um todo. Isto indica que as novas respostas positivas das plantas C<sub>4</sub> ao aumento da [CO<sub>2</sub>] são verdadeiras, pois, trata-se de um estudo envolvendo a planta toda, ao invés dos estudos anteriores realizados somente com a folha indicando que as C<sub>4</sub> não têm aumento da taxa fotossintética. Aliás, quando o foco é somente a folha, as respostas positivas podem ser mascaradas pelo processo de aclimação fotossintética – declínio do estímulo fotossintético, principalmente por causa da queda no teor de nitrogênio e teor de clorofila nas folhas ao longo do tempo e, conseqüentemente, do aumento da relação C:N – o que sugere que a aclimação ou estímulo pelo aumento da [CO<sub>2</sub>] são funções da escala.

Experimentos em que o intuito é analisar os impactos das mudanças climáticas nas culturas agrícolas e nas plantas em geral são baseados, principalmente, no aumento da concentração de gases, como o CO<sub>2</sub> ou O<sub>3</sub> e também pelo controle de outras variáveis ambientais, como temperatura, água e luz. Pritchard e Amthor (2005) fazem uma descrição dos métodos experimentais, bem como comparações entre eles. Geralmente os métodos laboratoriais, como os tubos foliares, câmaras de crescimento e estufas de vidro, apresentam maior controle das variáveis ambientais, podendo constituir ótimas ferramentas para estudos dos efeitos das mudanças climáticas nas plantas, porém, seus resultados não podem ser extrapolados para condições de campo, em vista da pequena escala trabalhada. Já os métodos de campo, como as câmaras de topo aberto e os FACEs (*free-air CO<sub>2</sub> enrichment*) não apresentam o mesmo controle das variáveis ambientais ou, em alguns casos, nem o controle de determinadas variáveis, porém sua grande vantagem reside nos resultados dos efeitos da [CO<sub>2</sub>] poderem ser extrapolados às escalas reais de campo.

As desvantagens das câmaras de topo aberto em relação às FACEs, apontadas por Ainsworth e Long (2005) e Long *et al.* (2005), são a formação de um microclima diferente no ambiente dentro da câmara, com temperatura e umidade maiores que do ambiente e, também, menores quantidades de luz por causa da cobertura plástica das câmaras, sendo estas variáveis ambientais mais difíceis de serem controladas. Vantagens em relação às FACEs são o menor custo financeiro de condução, como também ter o controle da água para as plantas, permitindo experimentos com restrição hídrica às plantas.

O milho (*Zea mays* L.) é uma planta C<sub>4</sub> que tende, geralmente, a apresentar pouco ou nenhum crescimento adicional em resposta às elevadas [CO<sub>2</sub>], quando não apresentam déficit hídrico (Ghannoum *et al.*, 2000). Neste ponto, Leakey *et al.* (2004) afirmam que os efeitos das

altas [CO<sub>2</sub>] nas plantas de milho não estão suficientemente compreendidos para permitir futuras predições concernentes às mudanças climáticas.

Rudorff *et al.* (1996) não obtiveram acréscimos na produtividade do milho à [CO<sub>2</sub>] de 500ppm em câmaras de topo aberto. Resultados similares também foram encontrados por Kim *et al.* (2007), trabalhando com câmaras climáticas em que a biomassa, área foliar e fotossíntese não apresentaram respostas positivas a altas [CO<sub>2</sub>]. Além disto, a eficiência de carboxilação das enzimas do mecanismo fotossintético das C<sub>4</sub> foi reduzida com aumento da [CO<sub>2</sub>], o que indica possível aclimação fotossintética. Entretanto, Leakey *et al.* (2004) mostraram que o milho sob altas [CO<sub>2</sub>] apresentou incremento máximo de 41% na assimilação de CO<sub>2</sub> e média de 10%, sendo que o valor máximo ocorreu em épocas menos chuvosas. Estes incrementos devem-se à alta concentração intracelular de CO<sub>2</sub>, às baixas condutâncias estomáticas e à redução na transpiração. Assim, os autores chamam a atenção para uma validação: sob condições favoráveis de crescimento, a taxa fotossintética do milho é insensível às elevadas [CO<sub>2</sub>]? Entretanto, em experimentos com câmaras de topo aberto (Samarakoon e Gifford, 1996), as plantas de milho sob estresse hídrico e alta [CO<sub>2</sub>] apresentam incremento de 50% no crescimento comparado às plantas sob [CO<sub>2</sub>] ambiente e bem irrigadas. Prins *et al.* (2007) também obtiveram respostas positivas no crescimento do milho a altas [CO<sub>2</sub>].

Como o milho é uma cultura de alto valor nutricional e econômico, são necessárias mais pesquisas para quantificar os impactos das mudanças climáticas nesta cultura, como também existem muitas controvérsias sobre as respostas da cultura do milho às novas condições do clima.

## **1.2. OBJETIVOS**

Neste trabalho, objetivou-se analisar algumas das respostas fisiológicas e quantificar a produtividade da cultura de milho (*Zea mays* L.) sob atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub>, assim como desenvolver câmaras de topo aberto, para possibilitar o enriquecimento do ar com CO<sub>2</sub> no ambiente em que as plantas foram cultivadas.

## **1.3. MATERIAIS E MÉTODOS**

O experimento foi conduzido na Infraestrutura de Pesquisa em Estresse Hídrico e Salino do Departamento de Engenharia Agrícola, localizada na área experimental de Irrigação e Drenagem do campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, no estado de Minas Gerais. O experimento foi conduzido durante o período de 28 de outubro de 2008 a 6 de março de 2009.

### **1.3.1. Estrutura física**

A Infraestrutura de Pesquisa em Estresse Hídrico e Salino é constituída de 21 lisímetros de drenagem, construídos sob ambiente protegido (Figura 1.1). Cada lisímetro tem capacidade para 1,12m<sup>3</sup> de solo, cujas dimensões são 1,0m de largura por 1,4m de comprimento e 0,8m de profundidade. Apesar de a Infraestrutura possuir 21 lisímetros, neste trabalho foram utilizados somente 12 lisímetros de drenagem, bem como a casa de vegetação foi descoberta durante o experimento, a fim de proporcionar maior iluminação para as plantas.



Figura 1.1 – Infraestrutura de Pesquisa em Estresse Hídrico e Salino do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa: A – apresentação externa da Infraestrutura; e B – apresentação interna da Infraestrutura.

### 1.3.1.1. Desenvolvimento das câmaras de topo aberto

Para o enriquecimento do ar com  $\text{CO}_2$ , foram desenvolvidas câmaras de topo aberto. O desenvolvimento das câmaras teve como base as câmaras de topo aberto utilizadas por Costa (2003), Lobo (2003) e Souza (2007). As câmaras, desenvolvidas para o presente trabalho, foram compostas por módulos retangulares, possuindo portas laterais para facilitar a coleta de dados, o que as diferencia das câmaras utilizadas por Costa (2003), Lobo (2003) e Souza (2007), que não possuíam portas de acesso e eram compostas por uma única peça, dificultando a coleta de dados e manuseio das plantas. Também foi acrescentada uma campânula, para permitir o controle da água no ambiente das câmaras.

As câmaras foram desenvolvidas para acompanhar o crescimento das plantas, sendo acrescentados módulos de acordo com a altura delas. Assim, as câmaras podem atingir até 3,0m de altura, com quatro módulos. As câmaras e, conseqüentemente, os módulos foram constituídos de estrutura metálica retangular, composta por segmento de tubos de ferro com diâmetro externo de 1,25cm. Cada módulo era coberto nas laterais por um filme plástico transparente com espessura de 100 $\mu\text{m}$ , usualmente utilizado na cobertura de casas de vegetação ou estufas. Para fixar o filme plástico à estrutura metálica, foram utilizados perfis de alumínio e mangueiras de borracha, com 1,60cm de diâmetro, seccionadas longitudinalmente em um dos lados, formando uma “garra” para prender o filme plástico aos tubos de ferro. Na parte superior das câmaras, a campânula com vão ao meio e coberta por lanternim permitiu a troca gasosa e, ao mesmo tempo, o controle da água no ambiente. A campânula era formada pela mesma estrutura metálica e filme plástico dos módulos. Os detalhes estruturais, juntamente com as dimensões das câmaras de topo aberto desenvolvidas, com suas partes (módulos e campânulas), são ilustrados no projeto das câmaras (Figura 1.2).

O sistema de injeção de ar nas câmaras foi realizado por meio de um ventilador centrífugo, com hélice de 20cm de diâmetro e motor elétrico com potência de 1/16cv. O fluxo de ar proveniente do ventilador era direcionado para dentro da câmara por tubos de PVC, com diâmetro interno de 50mm. Esses tubos de PVC foram perfurados para a distribuição homogênea do ar (ambiente e enriquecido com  $\text{CO}_2$ ), com furos espaçados entre si de 2,5cm, e 7,14mm de diâmetro com ângulo de 30° de inclinação. Para direcionar o fluxo para o centro da câmara, a tubulação central foi perfurada em ambos os lados, enquanto as laterais foram

perfuradas somente em um dos lados. A Figura 1.3 mostra os detalhes da tubulação de distribuição de ar dentro da câmara, em que as setas azuis indicam a direção do fluxo de ar ambiente ou enriquecido com CO<sub>2</sub> para dentro da câmara.

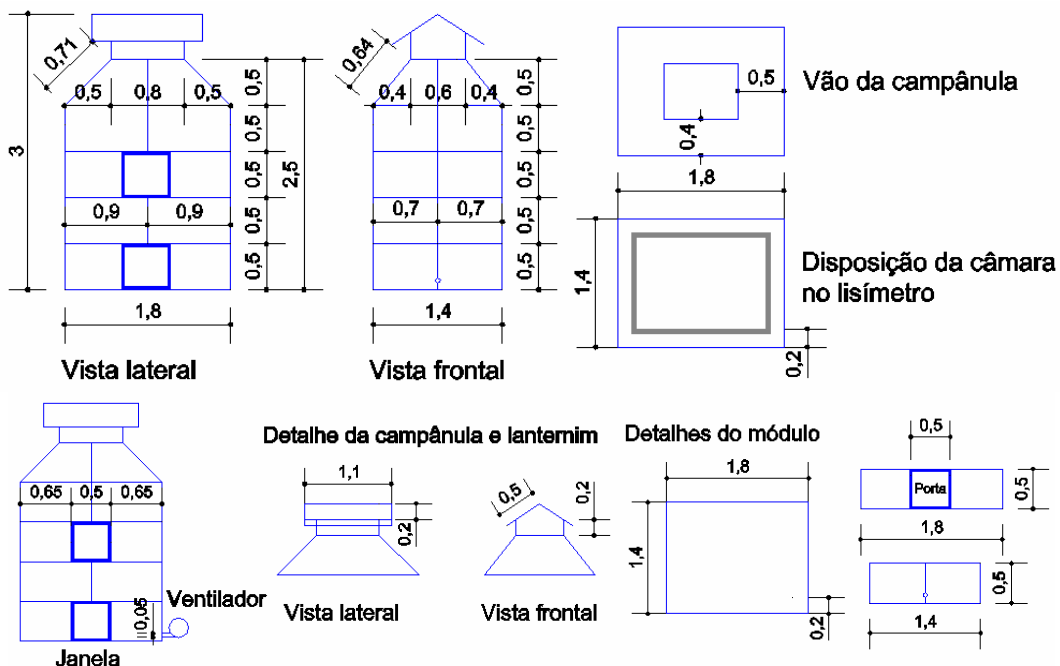


Figura 1.2 – Dimensões (m) e detalhes estruturais das câmaras de topo aberto desenvolvidas para este trabalho, juntamente com os módulos e a campânula.

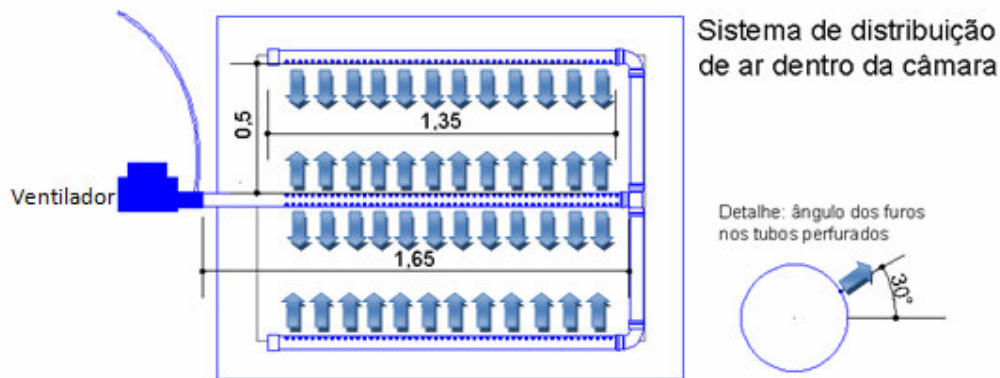


Figura 1.3 – Dimensões (m) e detalhes do sistema de distribuição de ar dentro das câmaras, em que as setas azuis indicam a direção do fluxo de ar ambiente ou enriquecido com CO<sub>2</sub> para dentro da câmara.

O CO<sub>2</sub> era armazenado em cilindros, com 23kg de gás, onde o fluxo primário era regulado por manômetro de pressão especial (White Martins – R201C), acoplado a uma válvula solenóide de alta pressão, composta por uma válvula de fechamento esférico e atuador elétrico. Após a regulagem, o fluxo era direcionado às câmaras por mangueiras de alta pressão, 500psi. A válvula solenóide, por meio de temporizadores, também controlava o tempo de exposição diário das plantas ao CO<sub>2</sub>. Próximo às câmaras, o fluxo era novamente regulado por uma válvula de ajuste fino, para finalmente chegar ao sistema de injeção de CO<sub>2</sub> – ventilador mais os tubos de PVC perfurados. As [CO<sub>2</sub>] nas câmaras foram monitoradas e ajustadas

manualmente, durante a manhã a cada dois dias, com uso do medidor da [CO<sub>2</sub>] do ambiente modelo Testo 535.

O tempo de exposição das plantas à atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub> decorria-se diariamente entre 6:00 e 18:00h, sendo os ventiladores acionados automaticamente por temporizadores. Para evitar o excesso de umidade interna dentro das câmaras no período noturno, os ventiladores eram programados por temporizadores para serem ligados à noite, entre 20:00 às 21:00h, 23:00 às 00:00h e 3:00 às 4:00h.

### 1.3.1.2. Sistema de irrigação

As plantas foram irrigadas por meio de fitas gotejadoras (0,30m de espaçamento entre gotejadores), para manter o solo acima da capacidade de campo. O teor de água no solo foi monitorado por meio de sondas TDRs, instaladas a 0,20 e 0,4m de profundidade (Figura 1.4A), sendo as leituras automáticas feitas a cada 15 minutos (Figura 1.4B) a partir da TDR 100 da Campbell Scientific. A capacidade de campo foi determinada pela curva de retenção do solo, correspondendo a 20kPa, ou 33,62% de teor de água no solo. Desta forma, as plantas eram irrigadas sempre que o teor de água ficava abaixo da capacidade de campo.

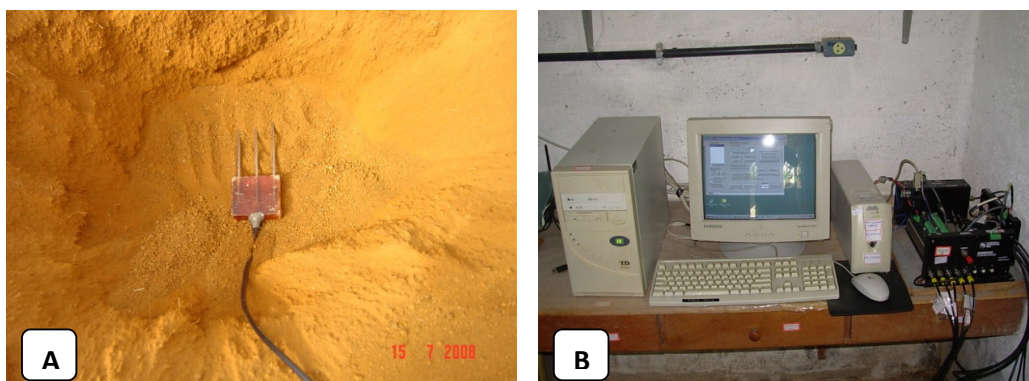


Figura 1.4 – Sondas TDRs utilizadas para controle do teor de água no solo: A – sonda TDR instalada a 0,20m de profundidade; e B – sistema automático de leitura do teor de água no solo a cada 15 minutos.

### 1.3.2. Solo e adubação

O solo utilizado para preenchimento dos lisímetros foi um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, com classe textural Muito Argilosa: 70% argila; 9% silte; 12% areia grossa; e 9% areia fina. Neste substrato, fez-se a correção da acidez do solo por calagem, com base nos valores apresentados na Tabela 1.1. Para correção, utilizou-se calcário dolomítico com PRNT (Poder Relativo de Neutralização Total) de 80%. Na Tabela 1.2 encontra-se a análise química do substrato de solo após correção.

Foram também realizadas duas adubações durante o experimento, sendo a primeira de plantio e a segunda de cobertura. Ambas as adubações seguiram recomendações de Ribeiro *et al.* (1999), porém com dosagem dobrada. A adubação de plantio foi realizada com a formulação NPK 8-28-16, na dosagem de 800kg.ha<sup>-1</sup>, enquanto a adubação de cobertura foi realizada com a formulação NPK 20-05-20, na dosagem de 800kg.ha<sup>-1</sup>. A adubação de cobertura foi realizada quando a quarta folha se expandiu totalmente, correspondendo ao 22<sup>o</sup> dia após o plantio (DAP).

Tabela 1.1 – Resultados analíticos do solo utilizado antes da correção da acidez por calagem

H <sub>2</sub> O	mg.dm <sup>-3</sup>			cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>						
pH	P	K	Na	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	CTC(t)	CTC(T)
4,75	0,2	7	0,7	0,01	0,02	0,58	5,9	0,05	0,63	5,95
V	% m		dag.kg <sup>-1</sup>	mg.L <sup>-1</sup>	mg.dm <sup>-3</sup>					
0,8	92,21	ISNa	Mo	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
		0,48	0,9	5,5	-	-	-	-	-	-

em que, ISNa - índice de saturação de sódio; SB - soma de bases trocáveis; CTC (t) - capacidade de troca catiônica efetiva; CTC (T) - capacidade de troca catiônica em pH 7,0; V - índice de saturação de bases; m - índice de saturação de alumínio; e P-rem - fósforo remanescente.

Tabela 1.2 – Resultados analíticos do substrato de solo utilizado após a correção da acidez por calagem

H <sub>2</sub> O	mg.dm <sup>-3</sup>			cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>						
pH	P	K	Na	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	CTC(t)	CTC(T)
6,3	0,7	18	-	2,6	0,8	0,0	2,48	3,45	3,45	5,93
V	% m		dag.kg <sup>-1</sup>	mg.L <sup>-1</sup>	mg.dm <sup>-3</sup>					
58	0	ISNa	Mo	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
		-	0,9	-	0,2	14,4	1,0	0,4	0,2	-

### 1.3.3. Material vegetal

Utilizou-se a cultivar de milho AG 9010 da empresa Agrocere. Esta cultivar superprecoce tem ciclo previsto entre 115 a 125 dias, atingindo 2,00m de altura. O espaçamento entre plantas foi de 0,20m (Figura 1.5A) e entre fileiras de 0,50m (Figura 1.5B), totalizando 14 plantas por lisímetro. As plantas foram cultivadas somente no perímetro dos lisímetros (Figura 1.5). No decorrer do ciclo, fez-se o controle manual da lagarta-do-cartucho por meio de pinças. Entretanto, quando o grau de infestação era elevado, utilizou-se o inseticida Decis®.

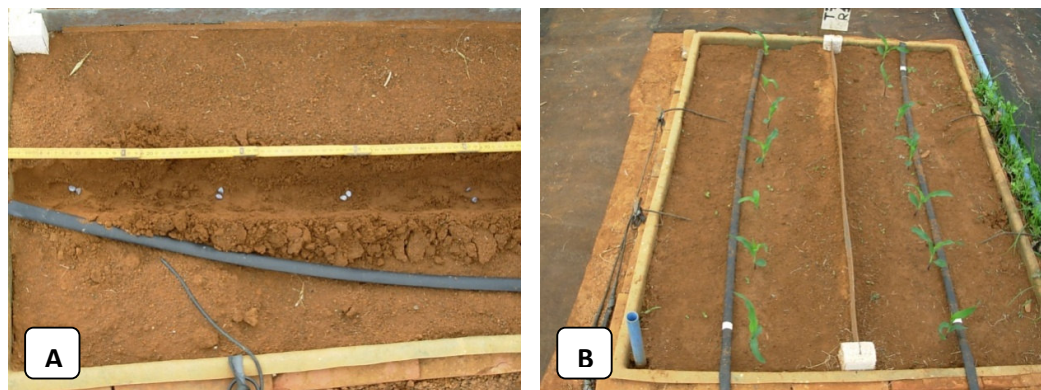


Figura 1.5 – Espaçamento: A – entre plantas, 0,20m; B – entre fileiras, 0,50m.

### 1.3.4. Dados coletados

Os dados coletados foram divididos em: ambientais, fisiológicos e fenológicos. Quanto aos dados referentes ao ambiente, foram coletados de hora em hora durante todo o experimento. Para isto, foi utilizada uma estação meteorológica automática e portátil, modelo Vantage Pro da Davis (Figura 1.6). Nessa estação, foram coletados dados de precipitação, radiação solar, temperatura ambiente e temperatura dentro das câmaras. Também, utilizou-se

um piranômetro para medir a radiação solar dentro das câmaras. Contudo, essa medição foi realizada antes do experimento, a cada quinze minutos durante duas semanas.



Figura 1.6 – Estação meteorológica automática portátil, modelo Vantage Pro da Davis.

Como dado fisiológico, foram medidas as taxas fotossintéticas das folhas das plantas de milho, entre 8:00 e 11:00h, utilizando um medidor portátil de fotossíntese (IRGA - Infra Red Gases Analyser), modelo LCi Photosynthesis System da ADC BioScientific, equipado com sistema de fonte de radiação externa,  $1200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (Figura 1.7). Duas medições da taxa fotossintética foram realizadas, nas seguintes datas: primeira medição no 69º DAP (estádio R1 – florescimento); e segunda medição no 80º DAP (estádio R3 – grãos em estado pastoso). Ambas as medições foram realizadas na 10ª folha das plantas, com  $[\text{CO}_2]$  de referência do interior das câmaras (700ppm) e ambiente, com fluxo de  $200\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ .

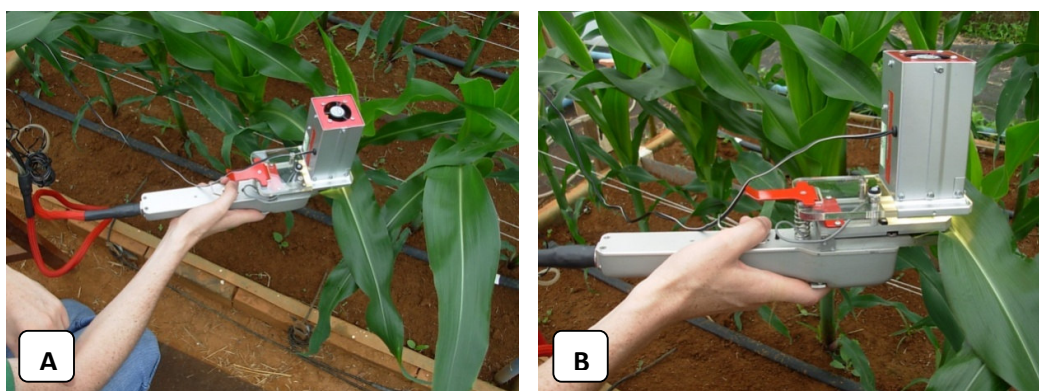


Figura 1.7 – Câmara foliar do medidor portátil de fotossíntese (IRGA - Infra Red Gases Analyser), modelo LCi (ADC BioScientific), equipado com fonte de radiação externa ( $1200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Os seguintes dados fenológicos foram coletados: altura máxima da planta; temperatura foliar; matéria seca da parte aérea; e produtividade. A altura máxima das plantas foi obtida no início da fase reprodutiva das plantas (69º DAP, estágio R1), pois, neste estágio, todas as folhas já se encontravam expandidas. A medição da altura máxima das plantas foi determinada entre o solo e a bainha da última folha expandida, no caso a 15ª folha. A temperatura foliar foi coletada, diariamente, quatro vezes ao dia, nos horários de 8:00, 11:00, 14:00 e 17:00h, sendo que começou a ser coletada no 19º DAP, estágio V3 (terceira folha totalmente expandida) e finalizou no 102º DAP, estágio R5 (grãos em estado farináceo-duro).

Para a coleta da temperatura foliar, foi utilizado um termômetro infravermelho com mira laser, modelo Fluke 62 Mini (Figura 1.8).



Figura 1.8 – Termômetro infravermelho com mira laser, modelo Fluke 62 Mini.

Quanto à produtividade e matéria seca, foram determinadas ao final do experimento. Para verificação da produtividade da cultura, foram analisadas as seguintes variáveis: peso total dos grãos; peso de mil grãos; e grãos por espiga. Para a medição da matéria seca, toda a parte aérea de três plantas foi secada em estufa controlada a 70°C por três dias, para posterior pesagem.

### 1.3.5. Delineamento experimental

O delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC), com quatro repetições (blocos). A escolha pela utilização do DBC foi devido à coleta dos dados de fotossíntese e temperatura foliar. A coleta desses dados se estendia por muito tempo, sendo necessário coletar os dados de todos os tratamentos em curto período de tempo, pois os valores da taxa fotossintética alteram ao longo do dia e a temperatura foliar altera-se na presença de nuvens.

Os tratamentos foram: P1 – plantas cultivadas em câmaras de topo aberto com concentração atmosférica enriquecida com CO<sub>2</sub>, a 700ppm; P2 – plantas cultivadas em câmaras de topo aberto com concentração atmosférica ambiente de CO<sub>2</sub>; e P3 – plantas testemunhas ou controle, cultivadas fora das câmaras de topo aberto. Foram utilizados três tratamentos e quatro repetições, totalizaram-se 12 observações.

O experimento foi instalado segundo o modelo estatístico:

$$Y_{ik} = m + \alpha_i + w_k + e_{ik} \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, P \text{ tratamento} \\ k = 1, 2, \dots, B \text{ bloco} \end{array} \quad (1.1)$$

em que

- $Y_{ik}$  valor observado no i-ésimo tratamento no k-ésimo bloco;
- $m$  média geral do experimento;
- $\alpha_i$  efeito do i-ésimo nível do tratamento;
- $w_k$  efeito do k-ésimo bloco; e
- $e_{ik}$  efeito residual (erro).

A exposição das plantas à atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub> iniciou-se no 18º DAP (estádio V3 – terceira folha totalmente expandida) e finalizou no 108º DAP (estádio R5), totalizando 91 dias.

### 1.3.5.1. Delineamento experimental para o desempenho das câmaras de topo aberto

Para avaliar o desempenho das câmaras de topo aberto desenvolvidas para este experimento, no que tange à alteração do microclima dentro das câmaras, foram utilizados os dados de radiação solar e temperatura do ambiente e de dentro das câmaras.

O delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC) foi utilizado para analisar os dados de radiação do piranômetro, tendo o objetivo de verificar se existe redução da radiação dentro das câmaras. Do total de dados coletados, foram utilizados somente metade, ou seja, somente os dados de uma semana para a comparação, sendo a metade utilizada para aferir o piranômetro ao sensor de radiação da estação meteorológica. Dois tratamentos foram avaliados: A1 – ambiente no interior das câmaras; e A2 – ambiente fora das câmaras. O número de repetições foi igual a seis, correspondendo à metade dos dias de leitura dos dados.

Foram utilizados os dados de temperatura ambiente e no interior das câmaras, a fim de verificar a mudança de temperatura no interior das câmaras. Para esta análise, fez-se um DIC com três tratamentos (P1, P2 e P3), porém as repetições foram o total de dias de exposição das plantas à alta [CO<sub>2</sub>] no ambiente (P1), totalizando 91 repetições.

Para esses dados de temperatura e radiação, o delineamento experimental (DIC) destas análises foi instalado segundo o modelo estatístico:

$$Y_{ij} = m + \alpha_i + e_{ij} \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, P \text{ tratamento} \\ j = 1, 2, \dots, R \text{ repetição} \end{array} \quad (1.2)$$

em que

$Y_{ij}$  valor observado do i-ésimo tratamento na j-ésima repetição;

$m$  média geral do experimento;

$\alpha_i$  efeito do i-ésimo nível do tratamento; e

$e_{ij}$  efeito residual (erro).

### 1.3.6. Análise estatística

Os dados coletados, antes da aplicação de algum método, foram submetidos a análises exploratórias para verificar a existência de valores discrepantes, descartando informações incompatíveis com os tratamentos aplicados.

As variáveis foram analisadas por meio da estatística descritiva simples (média, desvio padrão e coeficiente de variação), para posterior análise de variância (Anova). Na Anova dos DIC e DBC, foram examinados os efeitos dos tratamentos e blocos sobre as variáveis. Para comparação das médias dos diferentes níveis dos tratamentos, aplicou-se o teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade ( $Pr < 0,05$ ). Para as Anovas e teste de Tukey, foi utilizado o software SAS (Statistics Analyst System) for Windows-NT, versão 8.0, licenciado pela Universidade Federal de Viçosa (SAS, 1999), com o procedimento PROC GLM.

### 1.3.7. Cronograma das atividades do experimento

Na Tabela 1.3 apresenta-se a ordem cronológica dos eventos ao longo do experimento.

Tabela 1.3 – Cronograma das atividades realizadas ao longo do experimento

Eventos	Dias após plantio (DAP)	Data
Plantio	0º	28/10/2008
Adução de plantio	0º	28/10/2008
Início do tratamento com CO <sub>2</sub>	18º	14/11/2008
Início da medição da temperatura foliar	19º	15/11/2008
Adução de cobertura	22º	18/11/2008
Primeira medição de fotossíntese	69º	04/01/2009
Medição da altura máxima das plantas	69º	04/01/2009
Segunda medição de fotossíntese	80º	15/01/2009
Fim da medição da temperatura foliar	102º	06/02/2009
Fim do tratamento com CO <sub>2</sub>	108º	12/02/2009
Fim do experimento	130º	06/03/2009

## 1.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 1.4.1. Câmaras de topo aberto desenvolvidas e variáveis ambientais

As câmaras de topo aberto desenvolvidas para acompanhar o crescimento das plantas neste experimento, com um, dois, três e quatro módulos acrescentados, são ilustradas na Figura 1.9. O sistema de injeção e controle do fluxo de ar ambiente e enriquecido com CO<sub>2</sub>, para as câmaras de topo aberto desenvolvidas para este experimento, são ilustrados na Figura 1.10.

Como as estruturas das câmaras foram em módulos (Figura 1.9), permitindo acrescentar módulos com o crescimento da planta, foi possível otimizar o gasto com CO<sub>2</sub> ao longo do experimento, como também a utilização do controle de injeção e fluxo automático de CO<sub>2</sub>, expondo as plantas às altas [CO<sub>2</sub>] entre 6:00 e 18:00h (figuras 1.10C e 1.10D).

Para verificar se houve redução da radiação fotossinteticamente ativa (PAR - Photosynthetic Active Radiation), em MW.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, procedeu-se a Anova para os dados de radiação solar, coletados antes do início do experimento (Tabela 1.4). Observou-se que ocorreram diferenças significativas da radiação PAR no interior (A1) e fora das câmaras (A2). Esta redução da PAR no interior das câmaras (A1) foi de -25,41%, em relação à radiação PAR fora das câmaras (A2).

Tabela 1.4 – Anova para a radiação fotossinteticamente ativa (PAR - Photosynthetic Active Radiation), no ambiente interno das câmaras (A1) e fora das câmaras (A2)

FV	GL	QM	F
A	1	35,71	7,19 *
Erro	10	4,96	
Total	11		

em que: \* - significativo a 5% de probabilidade; FV – fator de variação; GL – graus de liberdade; QM – quadrado médio; e F – teste F.



Figura 1.9 – Câmaras de topo aberto com acréscimo dos módulos para acompanhar o crescimento e desenvolvimento das plantas: A - Câmaras com um módulo; B - Câmaras com dois módulos; C - Câmaras com três módulos; e D - Câmaras com quatro módulos.

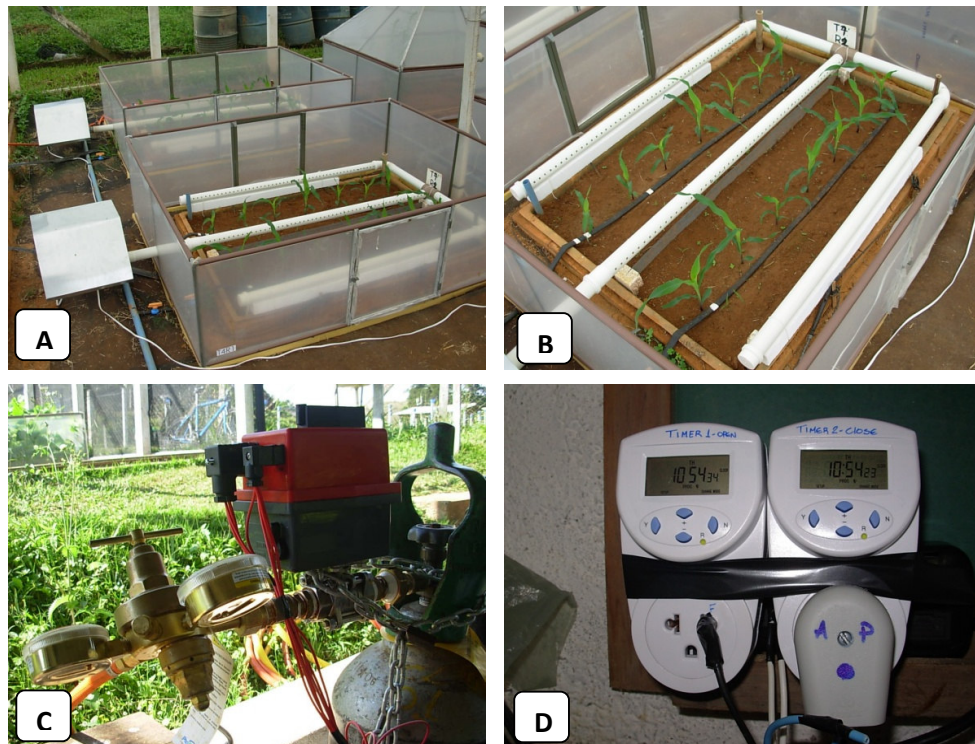


Figura 1.10 – Sistema de injeção e controle do fluxo de CO<sub>2</sub> às câmaras: A - ventilador e tubulação de ar dentro das câmaras; B - distribuição da tubulação dentro da câmara; C - manômetro e válvula solenóide conectada aos cilindros de CO<sub>2</sub>, juntamente com a fiação para controle da abertura e fechamento da mesma; e D - temporizador para controle da abertura e fechamento da válvula solenóide.

Na Tabela 1.5, encontram-se as médias, desvios padrões e coeficientes de variações das temperaturas médias, máximas e mínimas diárias dos ambientes dos tratamentos aplicados às plantas de milho – P1, P2 e P3, juntamente com o Teste de médias de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Observou-se que a temperatura máxima apresentou os maiores desvios padrões; por outro lado, as médias da temperatura mínima dos tratamentos não apresentaram grandes diferenças.

Tabela 1.5 – Médias, desvios padrões e coeficientes de variações (C.v.) para as temperaturas médias, máximas e mínimas diárias para cada ambiente dos tratamentos, juntamente com o Teste de médias de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para as temperaturas médias e máximas diárias (°C), em que médias na mesma coluna seguidas pela mesma letra são iguais

P	Temperatura média (°C)			Temperatura máxima (°C)			Temperatura mínima (°C)		
	Média	Desvio padrão	C.v. (%)	Média	Desvio padrão	C.v. (%)	Média	Desvio padrão	C.v. (%)
1	24,14 <sup>B</sup>	1,67	6,91	35,22 <sup>B</sup>	4,36	12,38	18,41	1,44	7,82
2	24,57 <sup>A</sup>	1,95	7,93	36,26 <sup>A</sup>	4,81	13,25	18,35	1,41	7,66
3	22,06 <sup>C</sup>	1,33	6,02	27,94 <sup>C</sup>	2,70	9,67	18,41	1,42	7,72

Na Tabela 1.6, são apresentados os resultados da Anova para as temperaturas médias, máximas e mínimas diárias dos ambientes dos tratamentos. Os tratamentos apresentaram diferenças significativas, ao nível de 5% de probabilidade, para as temperaturas médias e máximas diárias do ambiente dos tratamentos aplicados às plantas de milho, enquanto a mínima não apresentou diferenças.

Tabela 1.6 – Anova para as temperaturas média, máxima e mínima diária dos ambientes dos tratamentos aplicados às plantas de milho – P1, P2 e P3

FV	GL	Temperatura média		Temperatura máxima		Temperatura mínima	
		QM	F	QM	F	QM	F
P	2	163,29	58,93 *	1876,94	113,86 *	0,12	2,46 <sup>NS</sup>
Erro	270	2,77		16,48		2,02	
Total	272						

em que: NS – não significativo a 5% de probabilidade; \* - significativo a 5% de probabilidade; FV – fator de variação; GL – graus de liberdade; QM – quadrado médio; e F – teste F.

Os resultados do teste de médias de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, para as temperaturas médias e máximas são apresentados na Tabela 1.5. Todos os ambientes apresentaram temperaturas médias e máximas diárias diferentes, ao nível de 5% de probabilidade. Contudo, era esperado que as maiores temperaturas fossem encontradas em P1, em vista de o aumento da [CO<sub>2</sub>] no ambiente causar maiores alterações no microclima em relação a P2, que apresentou maiores valores (Tabela 1.5). Tal fato demonstra que, nas câmaras, o principal fator para aumento da temperatura é o vapor de água, oriundo do excesso de umidade dentro das câmaras. Apesar da diferença de temperaturas médias entre P1 e P2 ser pequena, 0,42°C, o mesmo não ocorreu para as máximas, 1,04°C. Estes resultados indicam que as câmaras alteraram o microclima, elevando a temperatura média diária em mais de 2°C e a máxima em mais de 7°C em relação ao ambiente, resultados estes que corroboram com as afirmativas de Ainsworth e Long (2005) e Long *et al.* (2005).

Na Figura 1.11, são apresentados os dados de radiação ( $\text{MW.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ) e precipitação diária (mm) coletados pela estação meteorológica ao longo do ciclo da cultura do milho. Observa-se que, durante o período experimental, ocorreu um grande volume total precipitado, 1263,80mm em 131 dias, o que causou uma redução na radiação para as plantas, devido às nuvens. Este grande volume precipitado somado à redução da radiação que as câmaras proporcionam, provocou um excesso de umidade dentro das câmaras. Esta alta umidade dentro das câmaras proporcionou o desenvolvimento de fungos nas folhas das plantas, reduzindo a área da folha para a fotossíntese em P1 e P2 (Figura 1.12). O desenvolvimento de fungos ocorreu após a floração (R1), devido ao excesso de pólen sobre as folhas das plantas nas câmaras.

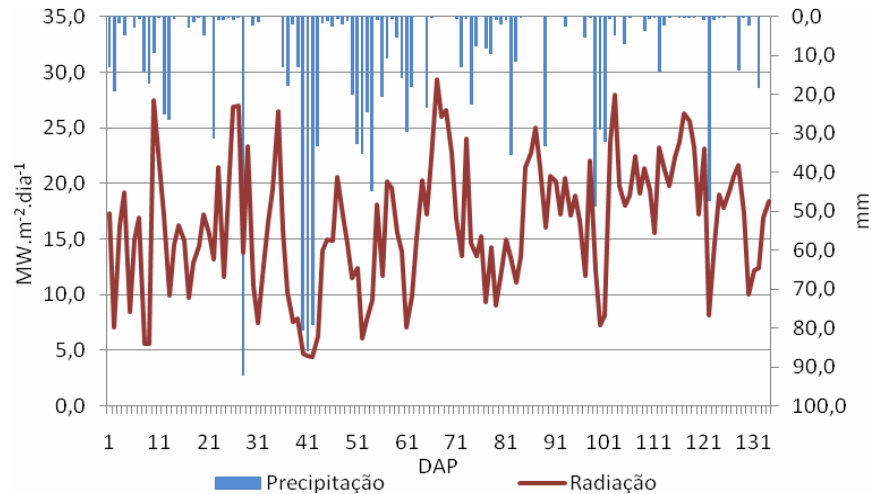


Figura 1.11 – Precipitação diária (mm) e radiação ( $\text{MW.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ).



Figura 1.12 – Fungos nas folhas das plantas de milho, reduzindo a área foliar útil para a fotossíntese.

#### 1.4.2. Taxa fotossintética

Na Tabela 1.7, são apresentadas as alterações em relação ao tratamento-controle (P3), médias, desvios padrões e coeficientes de variações de cada tratamento para as duas medições, juntamente com o teste de médias de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Na Tabela 1.8, são apresentadas as Anovas para as duas medições das taxas fotossintéticas ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) realizadas durante o experimento.

Tabela 1.7 – Alterações (%) em relação ao tratamento- controle (P3), médias, desvios padrões e coeficientes de variações (C.v.) para as duas medições da taxa fotossintética ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) das folhas, para os tratamentos aplicados às plantas de milho, juntamente com o Teste de médias de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, em que médias na mesma coluna seguidas pela mesma letra são iguais

P	Primeira medição				Segunda medição			
	Média	Desvio padrão	C.v. (%)	Alteração (%)	Média	Desvio padrão	C.v. (%)	Alteração (%)
1	43,02 <sup>A</sup>	8,11	18,85	27,73	45,68 <sup>A</sup>	8,09	17,70	32,02
2	36,66 <sup>B</sup>	10,05	27,42	8,85	37,11 <sup>A B</sup>	5,98	16,11	7,25
3	33,68 <sup>B</sup>	7,05	20,93	0,00	34,60 <sup>B</sup>	6,00	17,35	0,00

Nas duas medições, ocorreram diferenças significativas nas taxas fotossintéticas das plantas entre os tratamentos, como também para os blocos (Tabela 1.8). Desta forma, procedeu-se o teste de médias de Tukey, presente na Tabela 1.7, em que médias seguidas pela mesma letra não diferem ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 1.8 – Anova para as duas medições da taxa fotossintética das folhas das plantas de milho

FV	GL	Primeira medição		Segunda medição	
		QM	F	QM	F
P	2	91,16	12,29 *	135,03	6,93 *
Bloco	3	201,70	27,90 *	98,18	5,04 *
Erro	6	7,42		19,48	
Total	11				

em que: NS – não significativo a 5% de probabilidade; \* - significativo a 5% de probabilidade; FV – fator de variação; GL – graus de liberdade; QM – quadrado médio; e F – teste F.

Segundo Taiz e Zeiger (2004), com o aumento da  $[\text{CO}_2]$ , há estímulo na taxa fotossintética, uma vez que há maior diferença da  $[\text{CO}_2]$  na atmosfera em relação ao cloroplasto. Assim, é mais fácil chegar  $\text{CO}_2$  ao cloroplasto e, conseqüentemente, aumenta-se o substrato para a fotossíntese. No entanto, este efeito é mais pronunciado em se tratando de plantas  $\text{C}_3$ , uma vez que plantas  $\text{C}_4$  já dispõem naturalmente de mecanismo fisiológico mais eficiente de concentração de  $\text{CO}_2$  no sítio da Rubisco. Embora a taxa fotossintética não apresentasse diferença estatística na segunda medição entre P1 e P2 (Tabela 1.7), observou-se que as plantas submetidas ao tratamento P1 apresentaram maiores taxas fotossintéticas nas duas medições, 27,03 e 32,02% a mais do que P3, respectivamente, respondendo positivamente ao aumento da  $[\text{CO}_2]$ . Este resultado indica que plantas do tipo  $\text{C}_4$  podem responder ao aumento da  $[\text{CO}_2]$  no ambiente, ao contrário do observado por Taiz e Zeiger (2004) e Ziska e Bunce (2006), os quais mencionam que as plantas  $\text{C}_4$  não se beneficiam com o aumento da  $[\text{CO}_2]$  na atmosfera. Entretanto, Prithcard e Amthor (2005) mencionam que as plantas do tipo  $\text{C}_4$  se beneficiam com o aumento da  $[\text{CO}_2]$ , porém não de forma direta no aumento da taxa fotossintética, afirmativas estas que não condizem com os resultados apresentados na Tabela 1.7. Por outro lado, Wand *et al.* (1999), Leakey *et al.* (2004) e Souza (2007) encontraram acréscimos similares às taxas fotossintéticas de plantas  $\text{C}_4$ . Contrariamente, Kim *et al.* (2007) não encontraram estímulo fotossintético nas plantas de milho cultivadas em condições de altas  $[\text{CO}_2]$ .

Apesar de terem sido realizadas somente duas medições da taxa fotossintética, não foi observada aclimação fotossintética das plantas submetidas a altas [CO<sub>2</sub>], o que, segundo Ziska e Bunce (2006), deveria ser acentuada em plantas submetidas a altas [CO<sub>2</sub>] atmosféricas, com declínio da taxa fotossintética, principalmente em plantas cultivadas em ambientes protegidos (Ainsworth e Long, 2004).

### 1.4.3. Variáveis fenológicas

Na Tabela 1.9, encontram-se as estatísticas descritivas da altura máxima das plantas de milho (cm) e das médias das temperaturas foliares (°C) média, máxima e mínima ao longo do ciclo da cultura, juntamente com o teste de médias de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Na Tabela 1.10, encontra-se a Anova destas mesmas variáveis, em que todas as variáveis analisadas apresentaram diferenças significativas para os tratamentos aplicados.

Tabela 1.9 – Médias, desvios padrões e coeficientes de variações (C.v.) para a altura máxima das plantas de milho (cm) e das médias das temperaturas foliares (°C) média, máxima e mínima, juntamente com o teste de médias de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, em que médias na mesma coluna seguidas pela mesma letra são iguais

P	Altura máxima da planta (cm)			Temperatura foliar média (°C)			Temperatura foliar máxima (°C)			Temperatura foliar mínima (°C)		
	Média	Desvio padrão	C.v. (%)	Média	Desvio padrão	C.v. (%)	Média	Desvio padrão	C.v. (%)	Média	Desvio padrão	C.v. (%)
1	230,75 <sup>A</sup>	10,73	4,65	27,13 <sup>A</sup>	0,06	0,23	30,86 <sup>A</sup>	0,13	0,43	23,12 <sup>A</sup>	0,10	0,45
2	234,46 <sup>A</sup>	9,39	4,00	26,72 <sup>B</sup>	0,25	0,95	30,22 <sup>B</sup>	0,32	1,08	22,95 <sup>A</sup>	0,17	0,73
3	193,63 <sup>B</sup>	8,79	4,54	24,54 <sup>C</sup>	0,10	0,41	27,53 <sup>C</sup>	0,19	0,70	21,16 <sup>B</sup>	0,02	0,10

Tabela 1.10 – Anova para a altura máxima das plantas de milho e das médias das temperaturas foliares média, máxima e mínima

FV	GL	Altura máxima da planta		Temperatura foliar média		Temperatura foliar máxima		Temperatura foliar mínima	
		Q.M.	F	Q.M.	F	Q.M.	F	Q.M.	F
P	2	2039,68	17,15 *	7,58	373,93 *	12,29	413,52 *	4,66	453,00 *
Bloco	3	42,70	0,36 <sup>NS</sup>	0,05	2,23 <sup>NS</sup>	0,12	3,92 <sup>NS</sup>	0,02	2,05 <sup>NS</sup>
Erro	6	118,91		0,02		0,03		0,01	
Total	11								

em que: NS – não significativo a 5% de probabilidade; \* - significativo a 5% de probabilidade; FV – fator de variação; GL – graus de liberdade; QM – quadrado médio; e F – teste F.

As alturas máximas das plantas foram maiores para as plantas que cresceram dentro das câmaras P1 e P2 (Tabela 1.9). No entanto, a ocorrência desta maior altura não foi devido ao aumento da temperatura foliar e da câmara, ou mesmo da [CO<sub>2</sub>], mas devido à redução da radiação (Tabela 1.4), o que ocasionou estiolamento nas plantas. Em razão deste estiolamento, as plantas de P1 e P2 chegaram mais rapidamente ao estágio VT (pendoamento), encurtando o estágio vegetativo (estádios V0 a V15). Contudo, esta redução do estágio vegetativo não reduziu o ciclo das plantas, pois as plantas chegaram juntas ao estágio R1, assim como não diminuíram o número de folhas, pois todas as plantas desenvolveram 15 folhas.

Diferente das temperaturas do ambiente (Tabela 1.5), as maiores temperaturas foliares foram apresentadas por P1 (Tabela 1.9). A ocorrência de maiores temperaturas foliares de P1 podem ser devido a maior [CO<sub>2</sub>], que provavelmente ocasionou redução na condutância estomática das folhas, o que conseqüentemente diminuiu a taxa de transpiração e a troca de calor com o ambiente, aumentando a temperatura foliar, fato este que corrobora com as observações de Larcher (2006), Davies (2006) e Köner (2006). Este aumento da temperatura foliar é benéfico, pois aumenta a taxa fotossintética. Contudo, não foi observado este benefício, pois P2 e P3 não apresentaram diferenças estatísticas (Tabela 1.7), apesar de as temperaturas foliares de P2 serem maiores do que de P3 (Tabela 1.9) e as taxas fotossintéticas de P2, em relação a P3, serem 8,85 e 7,25% maiores na primeira e na segunda medição (Tabela 1.7), respectivamente.

O aumento da temperatura foliar (Tabela 1.9) e da temperatura ambiente (Tabela 1.5) não foram suficientes para reduzir o ciclo da cultura, embora a redução do ciclo devido a altas temperaturas seja comumente relatada (Köner, 2006; e Menzel e Sparks, 2006). Essa redução do ciclo devido ao aumento da temperatura foi observada por Renato (2009), com modelos de simulação de crescimento da cultura de cana-de-açúcar; contudo, este aumento reduziu muito o ciclo das culturas. Assim, os resultados do presente trabalho são importantes para a modelagem e simulação, pois auxiliam na calibração e simulação dos modelos, considerando-se que grande parte dos mesmos têm, como variável de entrada, a temperatura foliar, como o modelo proposto por Farquar *et al.* (1980).

Na Tabela 1.11, são apresentadas as estatísticas descritivas da matéria seca total da parte aérea (g), peso total dos grãos (g), peso de mil grãos e grãos por espiga, juntamente com o Teste de médias de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, para a matéria seca total da parte aérea da planta (g). Na Tabela 1.12, encontra-se a Anova destas variáveis.

Tabela 1.11 – Médias, desvios padrões e coeficientes de variações (C.v.) para a matéria seca total da parte aérea (g), peso total dos grãos (g), peso de mil grãos e grãos por espiga das plantas de milho, juntamente com o Teste de médias de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para matéria seca total da parte aérea (g), em que médias na mesma coluna seguidas pela mesma letra são iguais

P	Matéria seca total da parte aérea (g)			Peso total dos grãos (g)			Peso de mil grãos (g)			Grãos por espiga (grão)		
	Média	Desvio padrão	C.v. (%)	Média	Desvio padrão	C.v. (%)	Média	Desvio padrão	C.v. (%)	Média	Desvio padrão	C.v. (%)
1	1777,67 <sup>B</sup>	126,11	7,09	683,52	57,70	8,44	305,56	31,23	10,22	384,35	48,74	12,68
2	1816,54 <sup>AB</sup>	29,27	1,61	698,20	38,94	5,58	312,29	20,58	6,59	335,20	36,90	11,01
3	2008,29 <sup>A</sup>	118,28	5,89	767,70	49,12	6,40	294,13	11,31	3,85	392,04	23,73	6,05

Somente a matéria seca total da parte aérea apresentou diferenças significativas entre os tratamentos aplicados (Tabela 1.11). O peso total dos grãos (g), o peso de mil grãos (g) e o número de grãos por espiga não apresentaram diferenças significativas, mesmo com as maiores taxas fotossintéticas de P1 (Tabela 1.7), mostrando que o aumento da [CO<sub>2</sub>] não aumenta o peso individual dos grãos, como também não proporciona aumento na reprodução. Este fato não corrobora com as afirmativas de Jablonski *et al.* (2002) e Ziska e Bunce (2006),

que argüem que aumentos na [CO<sub>2</sub>] afetam a reprodução, pois o número de flores e a produção de pólen aumentam, o que consequentemente aumenta o número de grãos.

Tabela 1.12 – Anova para a matéria seca total da parte aérea, peso total dos grãos, peso de mil grãos e grãos por espiga das plantas de milho

FV	GL	Matéria seca total da parte aérea		Peso total dos grãos		Peso de mil grãos		Grãos por espiga	
		Q.M.	F	Q.M.	F	Q.M.	F	Q.M.	F
P	2	60976,86	7,13 *	8089,19	2,97 <sup>NS</sup>	337,03	0,86 <sup>NS</sup>	3774,08	2,18 <sup>NS</sup>
Bloco	3	13646,00	1,6 <sup>NS</sup>	1810,45	0,66 <sup>NS</sup>	742,77	1,89 <sup>NS</sup>	828,22	0,48 <sup>NS</sup>
Erro	6	8553,15		2724,25		392,01		1732,97	
Total	11								

em que: NS – não significativo a 5% de probabilidade; \* - significativo a 5% de probabilidade; FV – fator de variação; GL – graus de liberdade; QM – quadrado médio; e F – teste F.

Era esperada maior quantidade de matéria seca e produção (peso total dos grãos) nas plantas submetidas a P1, em vista das maiores taxas fotossintéticas de P1 (Tabela 1.7). As hipóteses para estes resultados, apresentados nas tabelas 1.11 e 1.12, foram os fungos nas folhas, reduzindo a área foliar para fotossíntese (Figura 1.12), bem como a redução da radiação pelo excesso de precipitação (Figura 1.11) e a redução média da radiação pelas câmaras, 25,41% (Tabela 1.4). Isto ocorreu porque as medições da taxa fotossintética foram feitas com irradiância próxima do ponto de saturação (1200µmol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>), mensurando a capacidade fotossintética máxima da folha. Além disso, as medições de fotossíntese foram feitas em uma folha por planta e a produtividade em grãos está mais relacionada ao ganho de carbono da planta inteira. Tal fato corrobora com Ziska e Bunce (2006), que afirmam que uma simples folha não é um bom indicativo para as respostas da fotossíntese e do crescimento da planta toda.

Outra hipótese para a matéria seca e peso total dos grãos de P1 (Tabela 1.11) não refletirem sua maior taxa fotossintética (Tabela 1.7), segundo Ainsworth e Long (2004), experimentos em ambientes protegidos amplificam a aclimação fotossintética e reduzem a produção devido às alterações no ambiente, geralmente denominado ‘efeito câmara’.

Resultados similares para a produção (peso total dos grãos) e matéria seca foram encontrados por Rudorff *et al.* (1996), Ghannoum *et al.* (2000) e Kim *et al.* (2007), trabalhando com câmaras, enquanto Samarakoon e Gifford (1996), Leakey *et al.* (2004) e Prins *et al.* (2007) encontraram resultados positivos para a produção de milho em altas [CO<sub>2</sub>], juntamente com Oliveira (2007) e Costa *et al.* (2009) utilizando modelos de crescimento de cultura.

## 1.5. CONCLUSÕES

Nas condições experimentais em que este trabalho foi desenvolvido, conclui-se:

- As câmaras de topo aberto, desenvolvidas para este experimento, alteram o microclima interno, apresentando acréscimos de mais de 2°C na temperatura média diária, como também reduz a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) às plantas em aproximadamente 25%, o que ocasiona estiolamento;

- O acréscimo de módulos na estrutura das câmaras de topo aberto otimiza o consumo de CO<sub>2</sub>, reduzindo o custo experimental para se obter uma atmosfera com alta [CO<sub>2</sub>];
- A taxa fotossintética das plantas de milho, tipo C<sub>4</sub>, ao contrário do que se acreditava, apresenta estímulo com o aumento da [CO<sub>2</sub>] no ambiente. Contudo, o aumento da temperatura foliar, em média mais 2°C, não proporciona aumento da taxa fotossintética, como também não altera o ciclo da planta; e
- Apesar da maior taxa fotossintética nas plantas de milho em ambientes com altas [CO<sub>2</sub>], a produção de grãos não é maior, como também não há incremento da matéria seca da parte aérea. Contudo, a redução de aproximadamente 25% da radiação pelas câmaras resulta em decréscimo da fotossíntese, podendo acarretar reflexos negativos para a produção e matéria seca.

## 1.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: 24 ago. 2007.

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. Disponível em: <[http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/cgi-bin/gw\\_46\\_4\\_2/chameleon](http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/cgi-bin/gw_46_4_2/chameleon)>. Acesso em: 24 out. 2007.

Costa, L. C.; Justino, F.; Oliveira, I. J. C.; Sediyaama, G. C.; Ferreira, W. P. M.; Lemos, C. F. Potential forcing of CO<sub>2</sub>, technology and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) yield in southeast Brazil. *Environmental Research Letters*, v. 4, p.1-10, 2009.

Davies, W. J. Responses of plant growth and functioning to changes in water supply in a changing climate. In: Morison, J.; Morecroft, M. *Plant growth and climate change*. Blackwell Publishing, 2006, 213p.

Farquar, G.D.; Von Caemmeres, S.; Berry, J.A. A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta*, n. 149, p. 78-90, 1980.

Ghannoum, O.; von Caemmerer, S.; Ziska, L. H.; Conroy, J. P. The growth response of C<sub>4</sub> plants to rising atmospheric CO<sub>2</sub> partial pressure: a reassessment. *Plant, Cell and Environment*, v. 23, p. 931 - 942, 2000. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: 24 ago. 2007.

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. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: 26 out. 2007.

- Jablonski, L. M.; Wang, X.; Curtis, P. S. Plant reproduction under elevated CO<sub>2</sub> conditions: a meta-analysis of reports on 79 crops and wild species. *New Phytologist*, v.156, p. 9-26, 2002. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: 27 out. 2007.
- Kim, S. H.; Gitz, D. C.; Sicher, R. C.; Baker, J. T.; Timlin, D. J.; Reddy, V. R. Temperature dependence of growth, development, and photosynthesis in maize under elevated CO<sub>2</sub>. *Environmental and Experimental Botany*, v. 61, p. 224 – 236, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 29 out. 2007.
- Köner, C. Significance of temperature in plant life. In: Morison, J.; Morecroft, M. *Plant growth and climate change*. Blackwell Publishing, 2006, 213p.
- Larcher, W. *Ecofisiologia Vegetal*. Tradução: Carlos Henrique Britto de Assis Prado. São Carlos: RiMa, 2006. 531p.
- Leakey, A. D. B.; Bernacchi, C. J.; Dohleman, F. G.; Ort, D. R.; Long, S. P. Will photosynthesis of maize (*Zea mays*) in the US Corn Belt increase in future [CO<sub>2</sub>] rich atmospheres? An analyses of diurnal courses of CO<sub>2</sub> uptake under free-air concentration enrichment (FACE). *Global Change Biology*, v.10, p. 951 - 962, 2004. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em: 26 ago. 2007.
- Lobo, F. A. *Alterações na assimilação e metabolismo do carbono em plantas de soja sob condições de atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub>*. Viçosa, MG: UFV, 2003, 105f. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003. Disponível em: <[http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/cgi-bin/gw\\_46\\_4\\_2/chameleon](http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/cgi-bin/gw_46_4_2/chameleon)>. Acesso em: 24 out. 2007.
- Long, S. P.; Ainsworth, E. A.; Leakey, A. D. B.; Morgan, P. B. Global food insecurity. Treatment of major food crops with elevated carbon dioxide or ozone under large-scale fully open-air conditions suggests recent models may have overestimated future yields. *Philosophical Transactions of The Royal Society B*, nº 360, p. 2011 – 2020, 2005. Disponível em: <<http://apps.isiknowledge.com>>. Acesso em: 29 fev. 2007.
- Menzel, A.; Sparks, T. Temperature and plant development: phenology and seasonality. In: Morison, J.; Morecroft, M. *Plant growth and climate change*. Blackwell Publishing, 2006, 213p.
- Newton, P.C.D.; Clark, H.; Bell, C.C.; Glasgow, E.M.; Interaction of soil moisture and elevated CO<sub>2</sub> on the above-ground growth rate, root length density and gas exchange of turves from temperate pasture. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 47, nº 299, p. 771 – 779, jun. 1996. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em: 28 jun. 2007.
- 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. Disponível em: <[http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/cgi-bin/gw\\_46\\_4\\_2/chameleon](http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/cgi-bin/gw_46_4_2/chameleon)>. Acesso em: 24 out. 2007.

- Prins, A.; Verrier, P.; Kunert, K. J.; Foyer, C. H. Acclimation of the maize transcriptome to CO<sub>2</sub> enrichment. *South African Journal of Botany*, v. 73, nº 2, p. 307 – 308, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 29 out. 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.
- Renato, N.S.; *Fotossíntese em cenários de mudanças climáticas: Adaptação de modelo para a produtividade potencial da cana de açúcar*. Viçosa, MG: UFV, 2009, 53f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009. Disponível em: <[http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/cgi-bin/gw\\_46\\_4\\_2/chameleon](http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/cgi-bin/gw_46_4_2/chameleon)>. Acesso em: 28 jun. 2010.
- Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez, V. H. *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação*. UFV, Editora da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1999, 360p.
- Rudorff, B. F. T.; Mulchi, C. L.; Lee, E. H.; Rowland, R.; Pausch, R. Effects of enhanced O<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub> enrichment on plant characteristics in wheat and corn. *Environmental Pollution*, v. 94, nº 1, p. 53 - 60, 1996. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 29 out. 2007.
- Samarakoon, A.B.; Gifford, R.M. Elevated CO<sub>2</sub> effects on water use and growth of maize in wet and drying soil. *Australian Journal of Plant Physiology*, v.23, p.53–62, 1996. Disponível em: <<http://www.isiknowledge.com>>. Acesso em: 20 jun. 2010.
- SAS. *User's guide*. Versão 8.0. Cary: SAS Institute Inc., 1999.
- Siqueira, O. J. W.; Steinmetz, S.; Salles, L. A. B.; Fernandes, J. M. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: Embrapa. *Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira*. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP, 2001, p. 33 – 64.
- Souza, A. P. *A cana-de-açúcar e as mudanças climáticas: efeitos de uma atmosfera enriquecida em CO<sub>2</sub> sobre o crescimento, desenvolvimento e metabolismo de carboidratos de Saccharum ssp*. Campinas, SP: UNICAMP, 2007, 91f. Dissertação (Mestrado em Biologia Celular), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2007.
- Taiz, L.; Zeiger, E. *Fisiologia Vegetal*. Artmed, 3ª edição, 2004, 820p.
- Wand, S. J. E.; Midgley, G. F.; Jones, M. H.; Curtis, P. S. Responses of wild C<sub>4</sub> and C<sub>3</sub> grass (*Poaceae*) species to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration: a meta analytic test of current theories and perceptions. *Global Change Biology*, v. 5, p.723-741, 1995.
- Ziska, L. H.; Bunce, J. A. Plant responses to rising atmospheric carbon dioxide. In: Morison, J.; Morecroft, M. *Plant growth and climate change*. Blackwell Publishing, 2006, 213p.

## **CAPÍTULO 2. Influências de duas concentrações de CO<sub>2</sub> e da disponibilidade hídrica na cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**

### **2.1. INTRODUÇÃO**

A concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre durante a última era glacial estava entre 160 e 200ppm. Após a revolução industrial, a [CO<sub>2</sub>] tem crescido de modo significativo, especialmente durante a segunda metade do último século. Acredita-se que a [CO<sub>2</sub>] atmosférica cresça entre 1 e 1,8ppm por ano (IPCC, 1995). Esta [CO<sub>2</sub>] atmosférica aumentou de 315ppm, em 1958, para 345ppm em 1985 (Streck, 2005). Consequentemente, espera-se que no final do século a concentração do CO<sub>2</sub>, dos atuais 380ppm dobre de valor.

Este aumento da [CO<sub>2</sub>] apresenta resultados diversos nas plantas de maneira direta e indireta. Os reflexos na fotossíntese deverão ser, em geral, positivos, embora as respostas possam variar entre as plantas. Na produção agrícola, os reflexos poderão ser positivos em decorrência tanto da estimulação da fotossíntese, especialmente para plantas com metabolismo tipo C<sub>3</sub> (ex.: arroz, soja, feijão), quanto do melhoramento da eficiência do uso da água como resultado da redução da condutância estomática, ou seja, fechamento parcial dos estômatos (Siqueira *et al.*, 2001).

Em revisão sobre experimentos em Face (*Free Air Carbon Enrichment*), Ainsworth e Long (2005) verificaram que as taxas fotossintéticas de plantas cultivadas em altas [CO<sub>2</sub>] aumentaram em 28%. Valores similares a este, 33%, foram encontrados anteriormente por Wand *et al.* (1999), em espécies de gramíneas C<sub>3</sub> sob diferentes condições de crescimento. O estudo de Ainsworth e Long (2005) também mostrou uma ocorrência de redução na condutância estomática em torno de 20% e aumento na eficiência do uso da água em até 50%. No entanto, outros resultados em câmaras de topo aberto (Lobo, 2003) mostraram que os aumentos na eficiência de uso da água e da taxa fotossintética podem chegar a incrementos em torno de 300 e 190%, respectivamente, em diferentes estádios vegetativos da planta.

Nas plantas C<sub>3</sub>, observam-se incrementos de 30 a 70% na taxa de assimilação do carbono, devido ao aumento de duas a três vezes na concentração atmosférica atual de CO<sub>2</sub>. Este efeito é devido, principalmente, ao aumento no gradiente da [CO<sub>2</sub>] do ar para a folha, o que favorece maior eficiência carboxilativa da Rubisco, em razão da maior disponibilidade de CO<sub>2</sub>, consequentemente reduzindo entre 20 e 40% o processo fotorrespiratório, ou fotorrespiração (Griffin e Luo, 1999; Taiz e Zeiger, 2004; e Ziska e Bunce, 2006). Outro fato para o aumento da taxa fotossintética, segundo Taiz e Zeiger (2004), reside na atual [CO<sub>2</sub>] atmosférica que é insuficiente para saturar a enzima Rubisco.

O aumento nas taxas fotossintéticas em conjunto com a melhora das relações hídricas, pelo fechamento parcial dos estômatos observado nas plantas cultivadas em elevada [CO<sub>2</sub>], normalmente gera incrementos na biomassa e altura das plantas, que podem ser respectivamente 49 e 12% maiores do que nas plantas cultivadas em atmosfera ambiente (Ainsworth e Long, 2005). Comparando o padrão de incremento de biomassa nas plantas de diferentes grupos funcionais cultivadas em altas [CO<sub>2</sub>], Poorter e Navas (2003) verificaram aumentos de 45% neste parâmetro em espécies herbáceas do tipo C<sub>3</sub>, 48% em arbóreas C<sub>3</sub>, 23% em plantas Cam (Crassulacean Acid Metabolism) e 12% em plantas C<sub>4</sub>.

Realizando uma ampla análise, Jablonski *et al.* (2002), nos trabalhos em ambiente enriquecido com CO<sub>2</sub> (na faixa de 500 a 800ppm), verificaram que, nessas condições, 79% das espécies estudadas aumentaram em média 19% o número de flores, 18% o número de frutos, 16% o número de sementes, 4% a massa de sementes individuais e 25% a massa total de sementes, embora ocorrendo uma redução de 14% no teor de nitrogênio das sementes.

Os efeitos benéficos no crescimento das plantas, oriundos das elevadas [CO<sub>2</sub>], dependem também de seu estado hídrico, pois, estes efeitos podem ser diferentes em plantas crescendo sob ótimas condições de água, em comparação com plantas crescendo em condições de deficiência hídrica (Idso, 1988). Plantas sob estresse hídrico têm uma substancial redução na condutância estomática, reduzindo trocas gasosas e, conseqüentemente, absorção de CO<sub>2</sub> (Davies, 2006). Assim, é importante considerar tanto a alta [CO<sub>2</sub>] quanto a disponibilidade de água no solo, para avaliar realmente os possíveis efeitos das mudanças do clima na produção agrícola. Altas [CO<sub>2</sub>] tendem a diminuir a abertura estomática nas folhas, reduzindo a quantidade de água perdida pela transpiração, o que resulta em maior resistência aos efeitos negativos do estresse hídrico. Nesta situação, plantas sob estresse hídrico são capazes de manter a absorção de CO<sub>2</sub> durante um tempo maior (Larcher, 2006).

Reduções observadas na condutância estomática com o aumento na [CO<sub>2</sub>] são bem conhecidas, porém não são universais. O mecanismo pelo qual o CO<sub>2</sub> altera a abertura estomática pode acarretar impactos a nível celular e bioquímico, que abrangem todos os processos da folha, particularmente a limitação estomática da fotossíntese e a alteração da eficiência do uso da água. Estudos têm focado esta questão, argumentando que reduções na condutância estomática podem reduzir a disponibilidade de CO<sub>2</sub> para a planta, resultando impactos negativos na fotossíntese. Entretanto, novos estudos sugerem que a limitação estomática para fotossíntese diminui, enquanto a condutância estomática é geralmente reduzida pelo aumento da [CO<sub>2</sub>]. Similarmente, outros concluem que o aumento da [CO<sub>2</sub>] aumenta o uso eficiente da água pela folha, definido pela quantidade de carbono fixado por perda de água. O aumento do uso eficiente da água na folha também implica no aumento, ou na manutenção, da fotossíntese e na fixação do carbono nas plantas C<sub>3</sub> sob estresse hídrico e em altas [CO<sub>2</sub>] (Ziska e Bunce, 2006).

Newton *et al.* (1996) e Clark *et al.* (1999) em experimentos com comunidades de plantas forrageiras sob estresse hídrico e alta [CO<sub>2</sub>], 750ppm, observaram que as maiores taxas fotossintéticas e eficiência no uso da água não apresentaram incremento no crescimento do dossel das plantas, pois grande parte do carbono fixado durante o período de déficit hídrico foi utilizado na manutenção e crescimento das raízes. Esses resultados são semelhantes àqueles obtidos por Aidar *et al.* (2002), porém com plântulas de jatobá (*Hymenaea courbaril*). Clark *et al.* (1999) também em estudos sobre as diferenças entre algumas plantas C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub> verificaram que as plantas C<sub>4</sub> apresentaram maiores potenciais de água nas folhas do que as C<sub>3</sub> – sob condições de elevada [CO<sub>2</sub>] e estresse hídrico – reflexo da melhor eficiência no uso da água. Em contrapartida, as plantas C<sub>3</sub> apresentaram maior crescimento nas folhas do que as C<sub>4</sub>, em altas [CO<sub>2</sub>].

Outro trabalho sobre os efeitos da interação CO<sub>2</sub> e estresse hídrico foi realizado por Tezara *et al.* (2002), em plantas de girassóis. Nesse trabalho, a eficiência do uso da água

aumentou em 230% nas plantas sem estresse hídrico e 380% nas plantas sob estresse hídrico, ambas sob o dobro da [CO<sub>2</sub>] ambiente.

Para a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), os trabalhos disponíveis encontrados na literatura científica relacionando o crescimento e desenvolvimento das plantas em ambiente enriquecido com CO<sub>2</sub> ainda são escassos, com destaque para Jifon e Wolfe (2002) e Lambreva *et al.* (2005). Ressalta-se, também, que estes dois trabalhos não foram realizados no Brasil.

No trabalho de Jifon e Wolfe (2002) foi verificada, além da influência do enriquecimento da [CO<sub>2</sub>] em câmaras de topo aberto, a interação com o suprimento de nitrogênio (N) disponível às plantas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). O efeito da taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> no crescimento das plantas, em ambiente enriquecido com CO<sub>2</sub>, foi significativamente maior (26 a 40%, dependendo do suprimento de N fertilizante), juntamente com a matéria seca total, em comparação com plantas sob ambiente normal. Especificamente nas folhas, a concentração de N sob ambiente enriquecido com CO<sub>2</sub> apresentou redução de 31 a 35%, em comparação com plantas sob atmosfera ambiente. Já a condutância estomática das plantas foi 35% menor em alta [CO<sub>2</sub>] do que na [CO<sub>2</sub>] ambiente, sendo que esta condutância diminui ao decorrer do ciclo da planta. Apesar destas respostas positivas ao tratamento com CO<sub>2</sub>, as plantas em ambiente enriquecido com CO<sub>2</sub> apresentaram aclimatação, principalmente nos tratamentos com baixo suprimento de N.

No entanto, no trabalho de Lambreva *et al.* (2005), os autores fizeram a interação entre temperatura, luz e [CO<sub>2</sub>] em plantas de feijão cultivadas hidroponicamente em câmaras de topo aberto. Em temperaturas de 23°C, as taxas fotossintéticas apresentaram incrementos nos ambientes de alta [CO<sub>2</sub>], enquanto em altas temperaturas (39°C) os efeitos das altas [CO<sub>2</sub>] nas taxas fotossintéticas foram negativos, indicando que altas temperaturas induzem quedas na fotossíntese. Um motivo do efeito negativo de altas temperaturas é a diminuição na atividade da enzima Rubisco.

Em razão de o feijão ser uma cultura de alto valor nutricional e econômico para o país, é importante conhecer as respostas a ambientes enriquecidos com CO<sub>2</sub> e estresse hídrico, possíveis cenários em um futuro próximo.

## **2.2. OBJETIVOS**

Neste trabalho, objetivou-se analisar e quantificar algumas das respostas fisiológicas e fenológicas, principalmente produtivas, da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) sob atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub> e sob estresse hídrico.

## **2.3. MATERIAIS E MÉTODOS**

O experimento foi conduzido na Infraestrutura de Pesquisa em Estresse Hídrico e Salino do Departamento de Engenharia Agrícola, localizada na área experimental de Irrigação e Drenagem do campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, no estado de Minas Gerais. O experimento foi conduzido durante período de 16 de abril a 27 de julho de 2009.

### 2.3.1. Estrutura física

A Infraestrutura de Pesquisa em Estresse Hídrico e Salino é constituída de 21 lisímetros de drenagem, construídos sob ambiente protegido (Figura 2.1). Cada lisímetro tem capacidade para 1,12m<sup>3</sup> de solo, cujas dimensões são 1,0m de largura por 1,4m de comprimento e 0,8m de profundidade. Durante o experimento, a casa de vegetação foi descoberta a fim de proporcionar maior iluminação às plantas. Apesar da Infraestrutura possuir 21 lisímetros, neste trabalho foram utilizados somente 12 lisímetros de drenagem, os quais foram divididos ao meio por um septo, formado por uma placa metálica, a fim de possibilitar o uso de subparcelas (Figura 2.2).

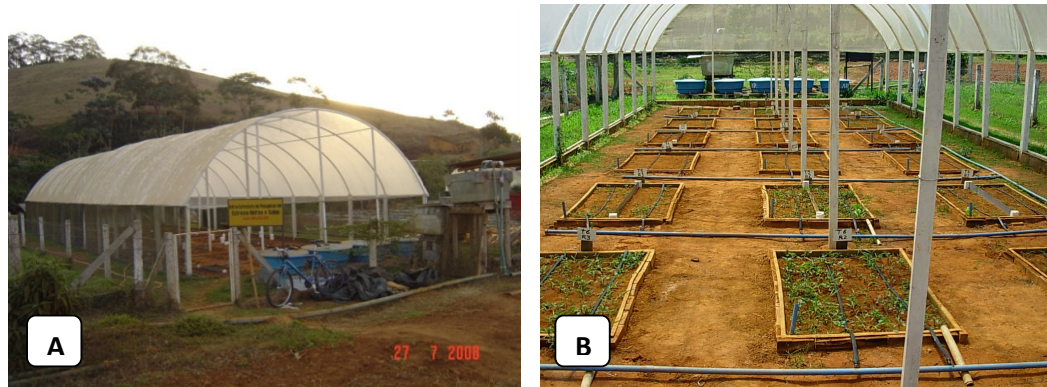


Figura 2.1 – Infraestrutura de Pesquisa em Estresse Hídrico e Salino do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa: A - apresentação externa da Infraestrutura; e B - apresentação interna da Infraestrutura.

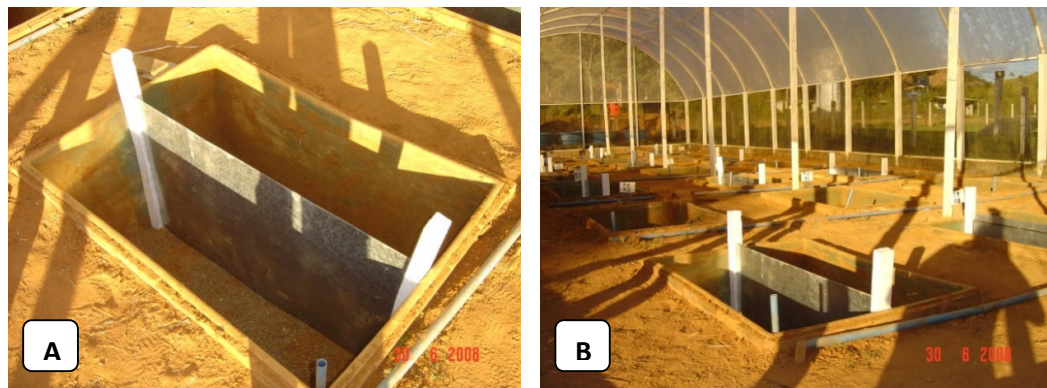


Figura 2.2 – Septos nos lisímetros de drenagem para dividir os mesmos em subparcelas: A - septo; e B - somente 12 lisímetros de drenagem com septos.

#### 2.3.1.1. Câmaras de topo aberto

O enriquecimento do ar com CO<sub>2</sub> foi obtido com câmaras de topo aberto. As câmaras de topo aberto foram desenvolvidas, baseando-se nas câmaras utilizadas por Costa (2003), Lobo (2003) e Souza (2007). As câmaras desenvolvidas para este trabalho foram compostas por módulos retangulares, possuindo portas laterais para facilitar a coleta de dados. Os módulos foram constituídos de estrutura metálica retangular, coberta com filme plástico transparente. Na parte superior da câmara, uma campânula com vão ao meio e coberta por um lanternim, permitiu a troca gasosa e, ao mesmo tempo, o controle da água no ambiente. O sistema de injeção de ar nas câmaras foi realizado por meio de um ventilador que direcionava

o fluxo para um tubo de PVC (diâmetro interno de 50mm), que percorria toda a extensão da câmara e bifurcando ao final dela em outros dois tubos. Para a distribuição homogênea do ar (ambiente e enriquecido com CO<sub>2</sub>), os tubos no interior foram perfurados, sendo os furos espaçados entre si de 2,5cm e diâmetro de 7,14mm. O CO<sub>2</sub> era armazenado em cilindros, onde o fluxo primário era regulado por manômetro de pressão especial, acoplado a uma válvula solenóide (Figura 2.3A), para depois ser direcionado às câmaras por mangueiras de alta pressão. A válvula solenóide, por meio de temporizadores (Figura 2.3B), também controlava o tempo diário de exposição das plantas ao CO<sub>2</sub>. Próximo às câmaras, o fluxo era novamente regulado por uma válvula de ajuste fino, para finalmente chegar ao sistema de injeção de CO<sub>2</sub>. As [CO<sub>2</sub>], dentro das câmaras, foram monitoradas e ajustadas a cada dois dias com o auxílio do medidor da [CO<sub>2</sub>] do ambiente modelo Testo 535.

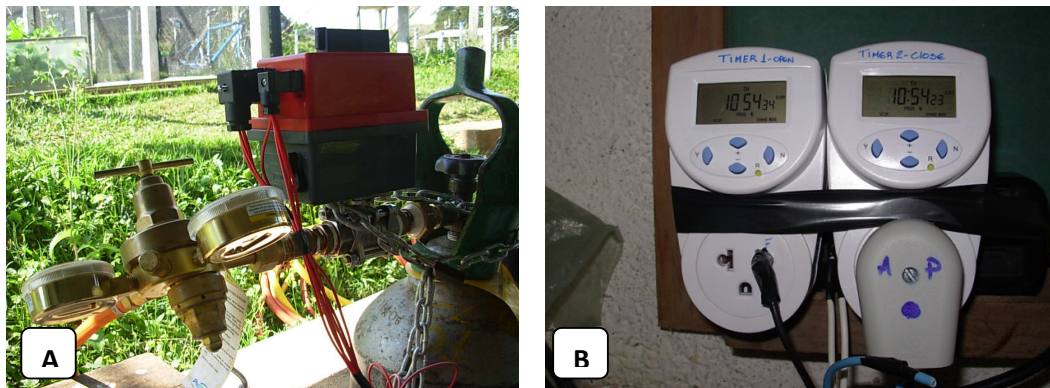


Figura 2.3 – Válvula solenóide: A – válvula solenóide conectada aos cilindros de CO<sub>2</sub>, juntamente com a fiação para controle da abertura e fechamento da mesma; e B – temporizador para controle da abertura e fechamento da válvula.

As câmaras foram desenvolvidas para acompanhar o crescimento das plantas e para isto eram acrescidos módulos de acordo com a altura das plantas. Na Figura 2.4, encontram-se as câmaras com um módulo e 1,0m de altura (Figura 2.4A) e com dois módulos e 1,5m de altura (Figura 2.4B).

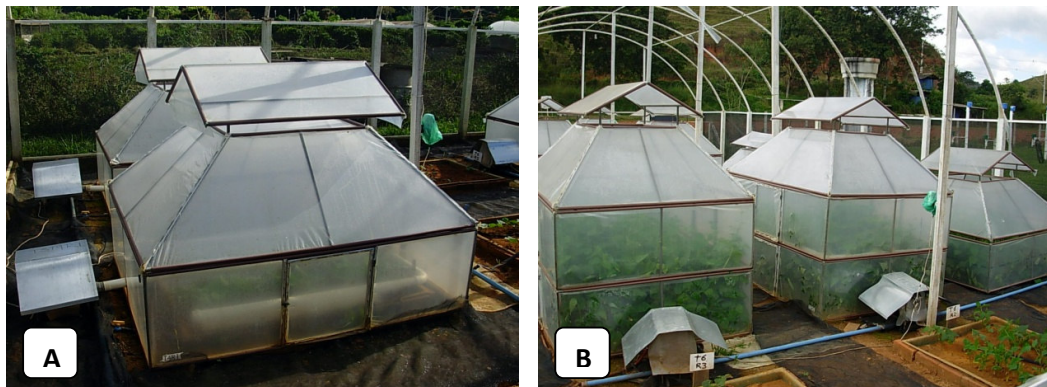


Figura 2.4 – Câmaras de topo aberto com acréscimo dos módulos para acompanhar o crescimento e desenvolvimento das plantas: A – Câmaras com um módulo; e B – Câmaras com dois módulos.

Para evitar o excesso de umidade interna dentro das câmaras no período noturno, os ventiladores eram programados por temporizadores para serem ligados à noite, entre 20:00 e 21:00h, 23:00 e 00:00h e entre 3:00 e 4:00h.

### 2.3.1.2. Sistema de irrigação

As plantas foram irrigadas por meio de fitas gotejadoras (0,15m de espaçamento entre gotejadores), para manter o solo na capacidade de campo. O teor de água no solo foi monitorado por meio de sondas TDRs instaladas a 0,20m de profundidade (Figura 2.5A), com leituras automáticas a cada 15 minutos (Figura 2.5B), a partir da TDR 100 da Campbell Scientific. A capacidade de campo e o ponto de murcha permanente foram determinados pela curva de retenção do solo, em que a capacidade de campo correspondia a 20kPa (33,62% de teor de água no solo), enquanto o ponto de murcha permanente a 500kPa (27,57% de teor de água no solo). Desta forma, as plantas eram irrigadas sempre que o teor de água ficava abaixo da capacidade de campo.

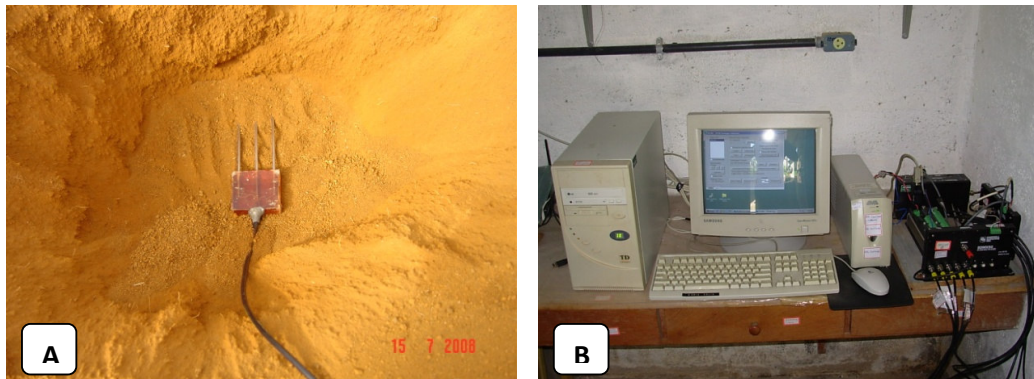


Figura 2.5 – Sondas TDRs utilizadas para controle do teor de água no solo: A – sonda TDR instalada a 0,20m de profundidade; e B – sistema automático de leitura do teor de água no solo a cada 15 minutos.

### 2.3.2. Solo e adubação

O solo utilizado para o preenchimento dos lisímetros foi um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, com classe textural Muito Argilosa: 70% argila; 9% silte; 12% areia grossa; e 9% areia fina. Neste substrato, a correção da acidez do solo foi feita por calagem, com base nos valores apresentados na Tabela 2.1. Para correção, utilizou-se calcário dolomítico com PRNT (Poder Relativo de Neutralização Total) de 80%. Na Tabela 2.2, é apresentada a análise química do substrato de solo após correção.

Foram também realizadas duas adubações, durante o experimento, sendo a primeira de plantio e a segunda de cobertura. Em ambas adubações, foram seguidas as recomendações de Ribeiro *et al.* (1999), com acréscimo de 30%. A adubação de plantio foi realizada com a formulação NPK 8-28-16, na dosagem de 650kg.ha<sup>-1</sup>, mais 300kg.ha<sup>-1</sup> de sulfato de magnésio, enquanto a adubação de cobertura foi realizada com 200kg.ha<sup>-1</sup> de uréia mais 250g.ha<sup>-1</sup> de molibdato de sódio via adubação foliar. A adubação de cobertura foi realizada no estádio V4, com o terceiro trifólio estava totalmente expandindo, correspondendo ao 20º dia após o plantio (DAP).

### 2.3.3. Material vegetal

Foi utilizada a cultivar de feijão Majestoso (UFV), tipo carioca, com ciclo curto. O espaçamento entre plantas foi de 0,05m e entre fileiras de 0,5m, totalizando 54 plantas por lisímetro e 27 por subparcela. As plantas foram cultivadas somente no perímetro dos

lisímetros. As sementes foram tratadas com fungicida Benlate® na proporção de 1g.kg<sup>-1</sup> de sementes. No decorrer do ciclo da cultura, as pragas foram controladas por meio de lesmicida, inseticidas Decis® e Oberon®, mais o fungicida Frowside®.

Tabela 2.1 – Resultados analíticos do solo utilizado antes da correção da acidez por calagem

H <sub>2</sub> O	mg.dm <sup>-3</sup>			cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>						
pH	P	K	Na	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	CTC(t)	CTC(T)
4,75	0,2	7	0,7	0,01	0,02	0,58	5,9	0,05	0,63	5,95
V	%		dag.kg <sup>-1</sup>	mg.L <sup>-1</sup>	mg.dm <sup>-3</sup>					
m	ISNa	Mo	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S	
0,8	92,21	0,48	0,9	5,5	-	-	-	-	-	-

em que, ISNa - índice de saturação de sódio; SB – soma de bases trocáveis; CTC (t) – capacidade de troca catiônica efetiva; CTC (T) – capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V – índice de saturação de bases; m – índice de saturação de alumínio; e P-rem – fósforo remanescente.

Tabela 2.2 – Resultados analíticos do substrato de solo utilizado após a correção da acidez por calagem

H <sub>2</sub> O	mg.dm <sup>-3</sup>			cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>						
pH	P	K	Na	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	CTC(t)	CTC(T)
6,3	0,7	18	-	2,6	0,8	0,0	2,48	3,45	3,45	5,93
V	%		dag.kg <sup>-1</sup>	mg.L <sup>-1</sup>	mg.dm <sup>-3</sup>					
M	ISNa	Mo	P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S	
58	0	-	0,9	-	0,2	14,4	1,0	0,4	0,2	-

### 2.3.4. Dados coletados

Os dados coletados foram divididos em: ambientais, fisiológicos e fenológicos. Quanto aos dados referentes ao ambiente, foram coletados de hora em hora ao longo de todo o experimento. Para isto, foi utilizada uma estação meteorológica automática e portátil, modelo Vantage Pro da Davis (Figura 2.6). Nessa estação, foram coletados dados de radiação solar, temperatura e precipitação. Também foi coletado o teor de água no solo, porém, conforme mencionado anteriormente, para estes foram utilizados sondas TDRs (Figura 2.5).



Figura 2.6 – Estação meteorológica automática portátil modelo Vantage Pro da Davis.

Os dados fisiológicos mensurados foram a taxa fotossintética e potencial osmótico da folha. A taxa fotossintética foi medida no período da manhã, entre 8:00 e 11:00h, utilizando-se um medidor portátil de fotossíntese (IRGA - Infra Red Gases Analyser), modelo LCI Photosynthesis System da ADC BioScientific, equipado com sistema de fonte de radiação

externa,  $1200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Como  $[\text{CO}_2]$  de referência, utilizou-se a  $[\text{CO}_2]$  do interior das câmaras (700ppm) e do ambiente, com fluxo de  $200\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ . Foram realizadas quatro coletas da taxa fotossintética, nas seguintes datas: 1ª medição – antes do início do estresse hídrico, no 20º DAP (estádio V3 – primeiro trifólio totalmente expandido); 2ª medição – ao decorrer do estresse hídrico, no 41º DAP (estádio R5 – pré-floração); 3ª medição – ao término do estresse hídrico, no 67º DAP (estádio R8 – preenchimento das vagens); e 4ª medição – após o estresse hídrico, no 82º DAP (estádio R9 – maturação).

Para o potencial osmótico das folhas, foram coletados três trifólios das plantas de cada subparcela ao término do estresse hídrico, no 70º DAP. Esses trifólios foram levados ao laboratório para extração do suco foliar, onde foi centrifugado posteriormente. Após a preparação das amostras, o potencial osmótico foi determinado por correlação, crioscópio modelo ITR MK 540.

Os seguintes dados fenológicos foram coletados: temperatura foliar; matéria seca da parte aérea; e produtividade. Para a produtividade da cultura, foram analisadas as seguintes variáveis: peso total dos grãos; peso de cem grãos; número de grãos por vagem; número de grãos por planta; e número de vagens por planta. Para a medição da matéria seca, toda a parte aérea da planta foi seca em estufa controlada a  $70^\circ\text{C}$  por três dias, para posterior pesagem.

A temperatura foliar foi coletada, diariamente, quatro vezes ao dia, nos horários de 8:00, 11:00, 14:00 e 17:00h. A coleta iniciou-se no 9º DAP, estágio V2 (folhas primárias totalmente expandidas) e finalizou no 85º DAP, estágio R9. Para a coleta da temperatura foliar, foi utilizado um termômetro infravermelho com mira laser, modelo Fluke 62 Mini.

### **2.3.5. Delineamento experimental**

O delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC), com quatro repetições (blocos) e em esquema de parcelas subdivididas. A escolha pela utilização do DBC foi devido à coleta dos dados de fotossíntese e temperatura foliar. A coleta desses dados se estendia por muito tempo, sendo necessário coletar os dados de todos os tratamentos em curto período de tempo, pois os valores da taxa fotossintética alteram ao longo do dia e a temperatura foliar altera-se na presença de nuvens.

As parcelas receberam três níveis do tratamento primário (P): P1 – plantas cultivadas em câmaras de topo aberto com  $[\text{CO}_2]$  a 700ppm; P2 – plantas cultivadas em câmaras de topo aberto com  $[\text{CO}_2]$  ambiente; e P3 – plantas testemunhas, cultivadas fora das câmaras. Os três níveis de P foram distribuídos ao acaso nas parcelas de cada um dos quatro blocos do experimento. As subparcelas receberam dois níveis do tratamento secundário (S): S1 – testemunha, sem estresse hídrico; e S2 – estresse hídrico, induzido antes da fase da floração até início da maturação. Os dois níveis de S foram distribuídos ao acaso dentro de cada parcela. Com os três níveis da parcela e os dois níveis da subparcela, as interações entre esses níveis da parcela com a subparcela resultaram em seis tipos de interações (tratamentos) e, devido às quatro repetições e ao esquema de subparcelas, totalizaram-se 12 parcelas e 24 observações. Na Tabela 2.3, apresenta-se o código e a descrição de todos os tratamentos.

Tabela 2.3 – Código e descrição dos tratamentos oriundos das interações entre parcela e subparcela

Código	Descrição
P1S1	Plantas cultivadas em câmaras de topo aberto a [CO <sub>2</sub> ] de 700ppm, sem estresse hídrico
P1S2	Plantas cultivadas em câmaras de topo aberto a [CO <sub>2</sub> ] de 700ppm, com estresse hídrico
P2S1	Plantas cultivadas em câmaras de topo aberto a [CO <sub>2</sub> ] ambiente, sem estresse hídrico
P2S2	Plantas cultivadas em câmaras de topo aberto a [CO <sub>2</sub> ] ambiente, com estresse hídrico
P3S1	Plantas testemunhas, sem estresse hídrico
P3S2	Plantas testemunhas, com estresse hídrico

O experimento foi instalado, segundo o modelo estatístico:

$$Y_{ij} = m + \alpha_i + \delta_{ik} + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + w_k + e_{ijk} \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, P_{\text{parcela}} \\ j = 1, 2, \dots, S_{\text{subparcela}} \\ k = 1, 2, \dots, B_{\text{bloco}} \end{array} \quad (2.1)$$

em que

- $Y_{ij}$  valor observado na ij-ésima subparcela no k-ésimo bloco;
- $m$  média geral do experimento;
- $\alpha_i$  efeito do i-ésimo nível do tratamento primário;
- $\delta_{ik}$  efeito residual das parcelas (erro a);
- $\beta_j$  efeito do j-ésimo nível do tratamento secundário;
- $(\alpha\beta)_{ij}$  efeito da interação do i-ésimo nível do tratamento primário com j-ésimo nível do tratamento secundário;
- $w_k$  efeito do k-ésimo do bloco; e
- $e_{ijk}$  efeito residual das subparcelas (erro b).

Todas as plantas foram cultivadas em câmaras de topo aberto, exceto as plantas das parcelas testemunhas (P3). As plantas das parcelas P1 eram expostas diariamente à atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub> entre 6:00 e 18:00h, sendo o controle realizado por meio de uma válvula solenóide (Figura 2.3A). O enriquecimento do ar com CO<sub>2</sub> nas parcelas P1 iniciou-se no 9º DAP (estádio V2) e finalizou-se no 90º DAP (estádio R9), totalizando 81 dias de exposição dos tratamentos com a atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub>.

Nas subparcelas testemunhas, S1, as plantas foram adequadamente irrigadas ao longo de todo o ciclo, a fim de não apresentarem, em momento algum, estresse por falta de água. Nas subparcelas com estresse hídrico, S2, as plantas foram devidamente irrigadas até o 22º DAP (estádio V3 e V4), ou sete dias antes da fase de floração, quando foi realizada a supressão total da irrigação, voltando a serem irrigadas no 70º DAP (estádio R8), totalizando 48 dias de supressão da irrigação. Para as plantas cultivadas fora das câmaras, parcelas testemunhas (P3), durante a aplicação do estresse hídrico, quando existia a previsão de chuva, as campânulas eram colocadas (Figura 2.4B) para evitar que a precipitação atrapalhasse a aplicação do estresse hídrico nessas plantas.

### 2.3.6. Análise estatística

Os dados coletados, antes da aplicação de algum método, foram submetidos a análises exploratórias para verificar a existência de valores discrepantes, descartando informações incompatíveis com os tratamentos aplicados.

As variáveis foram analisadas por meio da estatística descritiva simples (média, desvio-padrão e coeficiente de variação), para posterior análise de variância (Anova). Na Anova, foram examinados os efeitos das parcelas, subparcelas, blocos e a interação entre parcelas e subparcelas sobre as variáveis. Para comparação das médias dos diferentes níveis das parcelas e subparcelas, aplicou-se o teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Para realizar as análises de variância, foi utilizado o SAS (Statistics Analyst System) for Windows-NT, versão 8.0, licenciado pela Universidade Federal de Viçosa (SAS, 1999), com o procedimento PROC GLM.

### 2.3.7. Cronograma das atividades do experimento

A Tabela 2.4 mostra a ordem cronológica dos eventos ao longo do experimento.

Tabela 2.4 – Cronograma das atividades realizadas ao longo do experimento

Eventos	Dias após plantio (DAP)	Data
Plantio	0º	16/04/2009
Adubação de plantio	0º	16/04/2009
Início do tratamento com CO <sub>2</sub>	9º	24/04/2009
Início da coleta de temperatura foliar	9º	24/04/2009
Primeira medição de fotossíntese	20º	05/05/2009
Adubação de cobertura	20º	05/05/2009
Início do tratamento com estresse hídrico	22º	07/05/2009
Segunda medição de fotossíntese	41º	26/05/2009
Terceira medição de fotossíntese	67º	21/06/2009
Medição do potencial osmótico	70º	24/06/2009
Fim do tratamento com estresse hídrico	70º	24/06/2009
Quarta medição de fotossíntese	82º	06/07/2009
Fim da coleta de temperatura foliar	85º	09/07/2009
Fim do tratamento com CO <sub>2</sub>	90º	14/07/2009
Fim do experimento	103º	27/07/2009

## 2.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 2.4.1. Variáveis ambientais

Na Figura 2.7, são apresentadas as temperaturas médias diárias (°C) ao longo do ciclo da cultura, em dias após o plantio (DAP). Observou-se que as temperaturas no interior das câmaras (P1 e P2) foram mais altas do que as temperaturas do ambiente externo (P3). Estas maiores temperaturas são devido à alteração do microclima no interior das câmaras, pois, as mesmas atuaram com miniestufas, aumentando a temperatura interna por reter as radiações de onda longa que são emitidas pelo solo, principalmente pelo vapor de água, em razão da alta umidade no interior das câmaras.

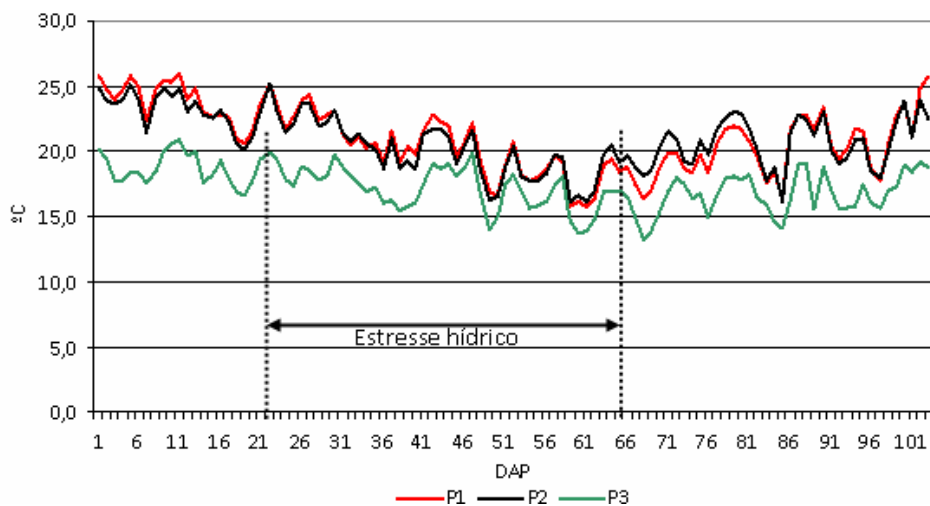


Figura 2.7 – Temperaturas médias diárias (°C) nos ambientes das parcelas ao longo do ciclo da cultura, em dias após o plantio (DAP), juntamente com o período em que as plantas foram submetidas ao estresse hídrico: P1 – temperatura (°C) no interior da câmara com [CO<sub>2</sub>] a 700ppm; P2 – temperatura (°C) no interior da câmara com [CO<sub>2</sub>] ambiente; e P3 – temperatura (°C) na parcela testemunha.

Durante a aplicação do estresse hídrico nas plantas (subparcelas – S2) ocorreram precipitações, conforme Figura 2.8. Exceto as precipitações ocorridas no 52º e 58º DAP, 10 e 14 mm respectivamente, as demais foram previstas a tempo, sendo que P3S2 foi protegido com a campânula (Figura 2.4). As precipitações imprevistas provocaram, no tratamento P3S2, aumento no teor de água no solo. Na Figura 2.9, são apresentados os teores de água no solo para os tratamentos aos quais foram aplicados o estresse hídrico, onde as setas azuis indicam as precipitações imprevistas. O teor de água no solo, para as plantas que foram submetidas ao estresse hídrico, apresentou valores mínimos de 26,99%, 26,38% e 28,76% para P1S2, P2S2 e P3S2, respectivamente.

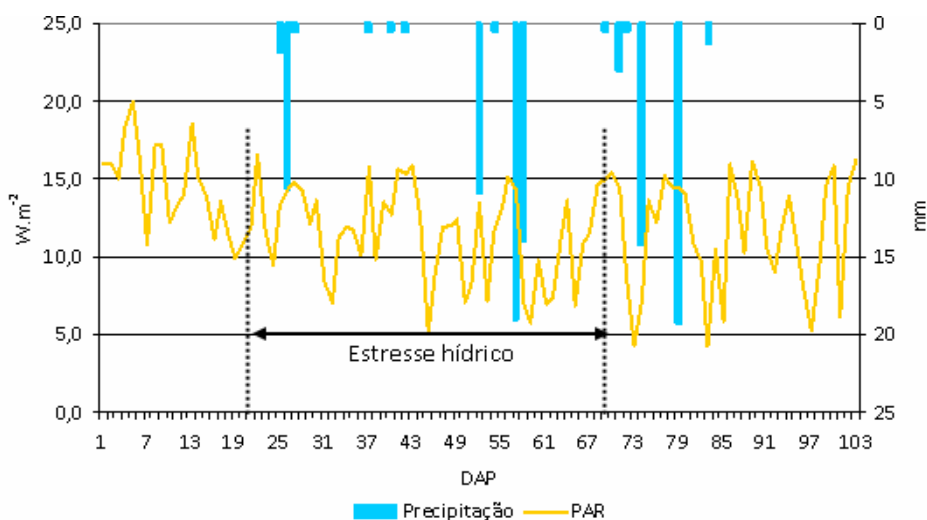


Figura 2.8 – Radiação fotossinteticamente ativa (PAR – Photosynthetic Active Radiation), em W.m<sup>-2</sup>, e volume precipitado, em dias após o plantio (DAP) do feijão, juntamente com o período em que as plantas foram submetidas ao estresse hídrico.

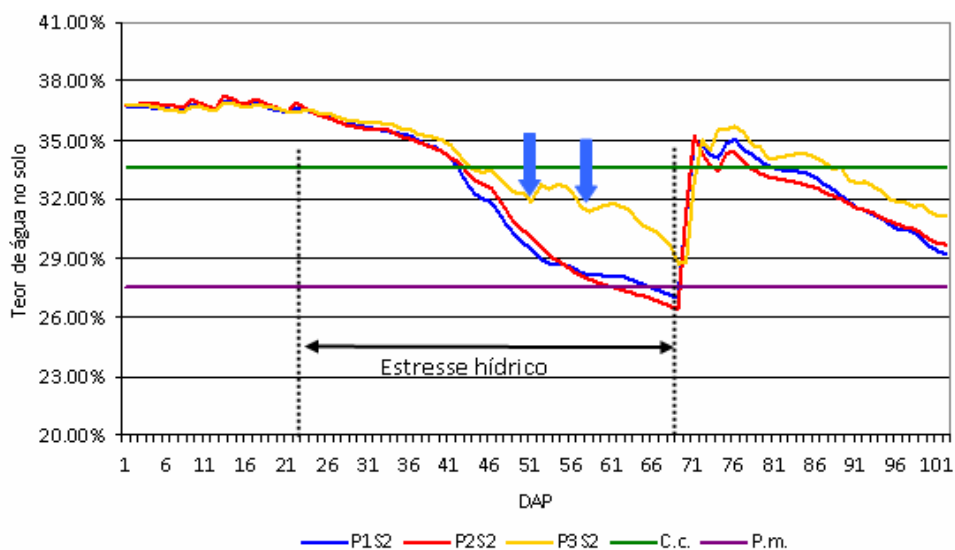


Figura 2.9 – Teor de água no solo para os tratamentos que foram submetidos ao estresse hídrico, juntamente com a capacidade de campo (C.c.), ponto de murcha permanente (P.m.) e período em que as plantas foram submetidas ao estresse hídrico. As setas azuis indicam o aumento do teor de água no solo pelas precipitações imprevistas que não foram previstas.

#### 2.4.2. Variáveis fisiológicas

Na Figura 2.10, apresentam-se os valores médios das quatro medições das taxas fotossintéticas ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) para cada tratamento, enquanto na Tabela 2.5 são apresentadas as médias, desvios padrões, coeficientes de variações e alterações de cada tratamento em relação ao tratamento-controle para cada uma das quatro medições. Na Tabela 2.6, são apresentadas as Anovas para as quatro medições das taxas fotossintéticas.

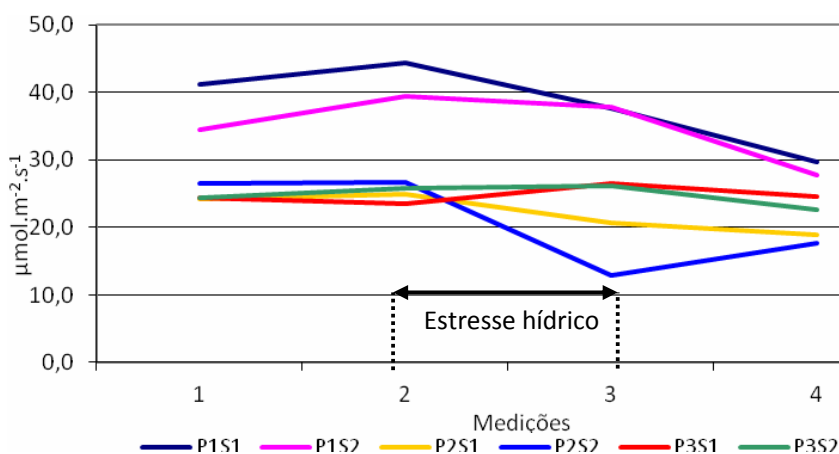


Figura 2.10 – Taxas fotossintéticas médias ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) de cada tratamento para as quatro medições realizadas.

As taxas fotossintéticas apresentaram maiores coeficientes de variação (C.v.) na 3ª e 4ª medição, em que P2S2 na 3ª medição apresentou o maior C.v. devido ao estresse hídrico, enquanto P1S1 na 4ª medição apresentou maior C.v. devido a chegada mais rápida à maturação (estádio R9) deste tratamento (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 – Médias (M), desvios padrões (Std), coeficientes de variações (C.v.) e alterações (%) de cada tratamento em relação ao tratamento controle (P3S1), para as quatro medições realizadas da taxa fotossintética ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ), para cada tratamento

Trat.	Primeira medição				Segunda medição				Terceira medição				Quarta medição			
	M	Std	C.v. (%)	Alt. (%)	M	Std	C.v. (%)	Alt. (%)	M	Std	C.v. (%)	Alt. (%)	M	Std	C.v. (%)	Alt. (%)
P1S1	41,2	1,5	3,7	69,5	44,3	7,9	17,7	87,9	37,7	6,6	17,6	41,9	29,7	8,2	27,7	20,6
P1S2	34,5	7,9	23,0	41,8	39,4	9,0	22,9	66,8	37,8	6,8	18,0	42,3	27,7	4,2	15,0	12,5
P2S1	24,3	3,4	14,1	-0,2	24,9	4,4	17,7	5,7	20,7	3,9	18,6	-22,0	19,0	4,0	21,2	-23,1
P2S2	26,5	2,4	8,9	9,2	26,6	1,5	5,6	12,8	12,9	4,9	38,4	-51,4	17,7	3,8	21,2	-28,3
P3S1	24,3	1,3	5,5	0,0	23,6	1,5	6,6	0,0	26,6	1,7	6,4	0,0	24,6	2,9	11,7	0,0
P3S2	24,3	4,0	16,4	0,0	25,9	2,8	11,0	9,7	26,2	1,3	4,9	-1,3	22,6	2,7	12,1	-8,2

Tabela 2.6 – Anovas para as quatro medições realizadas da taxa fotossintética das plantas de feijão

FV	GL	Primeira medição		Segunda medição		Terceira medição		Quarta medição	
		QM	F	QM	F	QM	F	QM	F
Bloco	3	27,38	4,02 <sup>NS</sup>	1,96	0,24 <sup>NS</sup>	27,69	1,01 <sup>NS</sup>	24,07	1,34 <sup>NS</sup>
P	2	452,38	66,44 *	735,53	88,98 *	878,99	31,92 *	216,76	12,03 *
Erro (a)	6	6,81		8,27		27,54		18,01	
S	1	13,23	0,67 <sup>NS</sup>	0,63	0,01 <sup>NS</sup>	43,38	2,53 <sup>NS</sup>	18,65	0,79 <sup>NS</sup>
P x S	2	44,12	2,23 <sup>NS</sup>	32,38	0,62 <sup>NS</sup>	39,55	2,30 <sup>NS</sup>	0,35	0,01 <sup>NS</sup>
Erro (b)	9	19,82		52,23		17,18		23,65	
Total	23								

em que: NS – não significativo a 5% de probabilidade; \* - significativo a 5% de probabilidade; FV – fator de variação; GL – graus de liberdade; QM – quadrado médio; e F – teste F.

Todas as medições de taxa fotossintética apresentaram diferença significativa para a parcela (P), ao nível de 5% de probabilidade. O bloco e a subparcela (S), juntamente com a interação entre os tratamentos (P x S), não apresentaram diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade. Para as fontes de variação em que a Anova foram significativas (Tabela 2.6), realizou-se o teste de Tukey (Tabela 2.7).

Na Tabela 2.7, observa-se que as plantas da parcela com aumento  $[\text{CO}_2]$ , P1, apresentaram maior estímulo na fotossíntese, enquanto P2 e P3 foram similares na primeira e segunda medições. Entretanto, as plantas submetidas ao estresse hídrico (S2) apresentaram resultados divergentes. As plantas do tratamento P2S2 apresentaram queda na taxa fotossintética, na terceira medição (ápice do término do estresse hídrico), -51,44% em relação a P3S1. Entretanto, nas plantas do tratamento P3S2, os resultados da terceira medição foram influenciados pelas precipitações ocorridas (Figura 2.9), diminuindo a magnitude do estresse hídrico ao qual as plantas foram submetidas – o teor de água no solo estava em 30,08%, enquanto em P1S2 e P2S2 o teor estava em 27,33 e 26,72%, respectivamente. Quanto às plantas do tratamento P1S2, não apresentaram queda na taxa fotossintética, em virtude da influência da elevada  $[\text{CO}_2]$ , o que reduz a condutância estomática e diminui a limitação estomática para a fotossíntese. Conseqüentemente, a alta  $[\text{CO}_2]$  aumenta o uso eficiente da água pela folha, definido pela quantidade de carbono fixado por perda de água. O aumento do uso eficiente da água na folha também sugere, se não aumento, ao menos a manutenção da fotossíntese nas plantas do tipo  $\text{C}_3$ , sob estresse hídrico (Ziska e Bunce, 2006).

Para o estresse hídrico (S2) e a interação (P x S), os resultados não apresentaram diferenças significativas (Tabela 2.6) na terceira medição, possivelmente devido à redução na magnitude do estresse hídrico (Figura 2.9) em P3S2, como também ao alto C.v. apresentado na terceira medição, principalmente por P2S2, 38,36%.

As plantas da parcela P1 apresentaram as maiores taxas fotossintéticas em relação às demais, em todas as quatro medições realizadas durante o ciclo da cultura (Tabela 2.7). Tal fato era esperado, pois, segundo Taiz e Zeiger (2004), com o aumento da [CO<sub>2</sub>] há aumento da taxa fotossintética, uma vez que aumenta a disponibilidade de CO<sub>2</sub> no sítio de carboxilação da Rubisco, principalmente nas plantas do tipo C<sub>3</sub>. Desta forma, é mais fácil chegar CO<sub>2</sub> ao cloroplasto, proporcionando, conseqüentemente, a redução nas taxas de oxigenação pela Rubisco, reduzindo a fotorrespiração, principalmente em plantas do tipo C<sub>3</sub>.

Tabela 2.7 – Teste médias de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para as quatro medições de taxa fotossintética ( $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ), em que médias na coluna seguidas pela mesma letra são iguais

P	Primeira Medição	Segunda Medição	Terceira Medição	Quarta Medição
P1	37,85 <sup>A</sup>	41,84 <sup>A</sup>	37,74 <sup>A</sup>	28,72 <sup>A</sup>
P2	25,40 <sup>B</sup>	25,77 <sup>B</sup>	16,80 <sup>C</sup>	18,31 <sup>B</sup>
P3	24,32 <sup>B</sup>	24,74 <sup>B</sup>	26,38 <sup>B</sup>	23,64 <sup>A<sup>B</sup></sup>

Particularmente na terceira e quarta medições, as taxas fotossintéticas de P1 e P2 começaram a declinar (Tabela 2.7). O mesmo fato não é observado na parcela P3, em que a taxa fotossintética permaneceu constante ao longo das quatro medições. O declino observado em P1 e P2 ocorre em virtude de dois aspectos, ou seja, aclimação fotossintética e redução no ciclo das plantas que foram cultivadas dentro das câmaras. A redução no ciclo das plantas de P1 e P2 é decorrente das maiores temperaturas no interior das câmaras. Quanto à aclimação fotossintética, segundo (Ziska e Bunce, 2006), é um processo em que a fotossíntese, devido ao aumento da [CO<sub>2</sub>], declina ao longo do ciclo da cultura, principalmente pela redução do teor de nitrogênio nas folhas (Ainsworth e Long, 2004). Desta forma, a união da redução do ciclo e aclimação fotossintética proporcionou uma queda na taxa fotossintética das plantas da parcela P1. Esta aclimação fotossintética também foi observada por Jifon e Wolfe (2002), em plantas de feijão.

Na segunda medição, quando o teor de água do solo estava um pouco abaixo da capacidade de campo, observaram-se maiores taxas fotossintéticas em todos os tratamentos em relação ao tratamento controle, P3S1 (Tabela 2.5). Essas maiores taxas fotossintéticas, com o teor de água no solo abaixo do ideal, ou seja, planas sob leve estresse hídrico, corroboram com as observações de Samarakoon e Gifford (1996), segundo os quais plantas com leve estresse hídrico sob atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub> apresentam maiores taxas fotossintéticas do que plantas sem estresse hídrico sob atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub>. Os aumentos na taxa fotossintética, em altas [CO<sub>2</sub>], também corroboram com as observações de Jifon e Wolfe (2002), Lambreva *et al.* (2005) e Pritchard e Amthor (2005), que relatam aumentos variando entre 20 e 60%, para feijão e outras plantas C<sub>3</sub>.

Na Tabela 2.8, são apresentadas as alterações (%) de cada tratamento em relação ao tratamento controle (P3S1), médias, desvios padrões, coeficientes de variações e teste de

médias de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para o potencial osmótico (MPa) das folhas de cada tratamento. Na Tabela 2.9, é apresentada a Anova para o potencial osmótico (MPa).

Tabela 2.8 – Alterações (%) de cada tratamento em relação ao tratamento controle (P3S1), médias, desvios padrões e coeficientes de variações (C.v.) para o potencial osmótico (MPa) das folhas de cada tratamento, juntamente com o teste de médias de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, em que médias na coluna seguidas pela mesma letra são iguais

Trat.	Média (MPa)	Desvio padrão	C.v. (%)	Alteração (%)
P1S1	-0,36 <sup>B</sup>	0,0047	0,17	-6,81
P1S2	-0,41 <sup>C</sup>	0,0132	0,54	-20,03
P2S1	-0,32 <sup>A</sup>	0,0218	0,70	5,82
P2S2	-0,41 <sup>C</sup>	0,0257	1,05	-19,95
P3S1	-0,34 <sup>AB</sup>	0,0101	0,34	0,00
P3S2	-0,34 <sup>AB</sup>	0,0089	0,30	0,11

Diferente dos resultados da Anova para a taxa fotossintética (Tabela 2.6), a Anova do potencial osmótico (Tabela 2.9) apresentou diferenças significativas entre a interação da parcela com a subparcela (P x S), ao nível de 5% de probabilidade. Assim, procedeu-se o desdobramento da Anova dos níveis da parcela na subparcela, como também dos níveis da subparcela na parcela.

Tabela 2.9 – Anova para o potencial osmótico (MPa) das folhas das plantas

FV	GL	QM	F
Bloco	3	4,03 10 <sup>-8</sup>	1,71 <sup>NS</sup>
P	2	4,19 10 <sup>-7</sup>	17,79 *
Erro (a)	6	2,35 10 <sup>-8</sup>	
S	1	1,16 10 <sup>-6</sup>	54,74 *
P x S	2	3,86 10 <sup>-7</sup>	18,21 *
Erro (b)	9	2,12 10 <sup>-8</sup>	
Total	23		

em que: NS – não significativo a 5% de probabilidade; \* - significativo a 5% de probabilidade; FV – fator de variação; GL – graus de liberdade; QM – quadrado médio; e F – teste F.

Pelo desdobramento da parcela na subparcela, S / P3 (Tabela 2.10), observou-se que a aplicação do estresse hídrico foi prejudicada pela precipitação (Figura 2.9), que ocorreu durante o experimento no tratamento P3S2, pois este foi o único desdobramento que não apresentou diferenças significativas, ao nível de 5% de probabilidade. Na Tabela 2.12, são apresentados os teores de água no solo ao final do estresse hídrico. Observa-se que o teor de água no solo da subparcela P3S2 foi mais alto do que das P1S2 e P2S2.

O aumento da [CO<sub>2</sub>] no ambiente diminui o potencial osmótico das folhas, como pode ser evidenciado nas diferenças entre os tratamentos P1S1 e P2S1 (Tabela 2.8). Esta diminuição do potencial osmótico da folha, em ambientes com elevada [CO<sub>2</sub>], é relacionada com o aumento da razão entre o número de mols do soluto e o volume da solução da célula. Deste modo, há um incremento na concentração de solutos, em virtude da maior taxa fotossintética, o que diminui o potencial osmótico na célula.

Tabela 2.10 – Desdobramento da Anova do potencial osmótico das folhas entre os níveis da parcela na subparcela e entre os níveis da subparcela na parcela

FV	GL	QM	F
S / P1	1	4,03 10 <sup>-7</sup>	18,97 *
S / P2	1	1,53 10 <sup>-6</sup>	72,19 *
S / P3	1	2,94 10 <sup>-11</sup>	0,00 <sup>NS</sup>
P / S1	2	1,84 10 <sup>-7</sup>	8,33 *
P / S2	2	6,21 10 <sup>-7</sup>	28,04 *

em que: NS – não significativo a 5% de probabilidade; \* - significativo a 5% de probabilidade; FV – fator de variação; GL – graus de liberdade; QM – quadrado médio; e F – teste F.

Tabela 2.11 – Teores de água no solo ao término do estresse hídrico

P1S1	P1S2	P2S1	P2S2	P3S1	P3S2	C.c.	P.m.
33,43%	26,99%	34,09%	26,38%	30,20%	28,76%	33,62%	27,57%

Para os tratamentos P1S2 e P2S2, foram evidenciados os menores valores de potencial osmótico. Tais valores são significativamente inferiores àqueles observados nos demais tratamentos (Tabela 2.8), de acordo com o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Os valores do potencial osmótico das plantas submetidas a P1S2 e P2S2 foram -20,03 e -19,95% inferiores à testemunha, P3S1. Entretanto, para P1S2 existe maior concentração de solutos na célula do que para P2S2 devido a maior assimilação fotossintética (Tabela 2.7), assim como para ambos ocorreu redução no volume celular, o que consequentemente reduziu o potencial osmótico na célula. Segundo Davies (2006), esta redução do potencial osmótico consiste em um mecanismo de defesa da planta contra o estresse hídrico, pois, além de favorecer a absorção de água, diminui a perda de água pelo processo de transpiração. Na Tabela 2.8, é possível observar que, em geral, os tratamentos que não foram submetidos ao estresse hídrico apresentaram os maiores valores de potencial osmótico da folha.

### 2.4.3. Variáveis fenológicas

Na Tabela 2.12, são apresentadas as estatísticas descritivas das médias das temperaturas foliares (°C) média, máxima e mínima ao longo do ciclo da cultura, enquanto na Tabela 2.13 encontra-se a Anova destas variáveis.

Tabela 2.12 – Médias, desvios padrões e coeficientes de variações (C.v.) para as médias das temperaturas foliares (°C) média, máxima e mínima

Trat.	Temperatura foliar média (°C)			Temperatura foliar máxima (°C)			Temperatura foliar mínima (°C)		
	Média	Desvio padrão	C.v. (%)	Média	Desvio padrão	C.v. (%)	Média	Desvio padrão	C.v. (%)
P1S1	21,64	0,40	1,85	26,24	0,45	1,72	17,08	0,32	1,85
P1S2	21,68	0,44	2,04	26,17	0,53	2,01	17,15	0,37	2,13
P2S1	21,58	0,39	1,82	25,85	0,52	2,01	17,19	0,27	1,57
P2S2	21,49	0,39	1,82	25,72	0,59	2,30	17,13	0,28	1,64
P3S1	19,69	0,17	0,88	23,53	0,25	1,07	15,54	0,15	0,93
P3S2	19,67	0,21	1,08	23,61	0,37	1,59	15,55	0,17	1,11

Tabela 2.13 – Anova para as médias das temperaturas foliares média, máxima e mínima

FV	GL	Temperatura foliar média (°C)		Temperatura foliar máxima (°C)		Temperatura foliar mínima (°C)	
		Q.M.	F	Q.M.	F	Q.M.	F
Bloco	3	0,62	9,58 *	1,07	11,48 *	0,43	19,95 *
P	2	10,10	155,92 *	16,27	174,53 *	6,73	312,41 *
Erro (a)	6	0,06		0,09		0,02	
S	1	0,01	1,74 <sup>NS</sup>	0,02	1,20 <sup>NS</sup>	0,00	0,00 <sup>NS</sup>
P x S	2	0,01	1,74 <sup>NS</sup>	0,03	2,10 <sup>NS</sup>	0,01	3,68 <sup>NS</sup>
Erro (b)	9	0,05		0,11		0,03	
Total	23						

em que: NS – não significativo a 5% de probabilidade; \* - significativo a 5% de probabilidade; FV – fator de variação; GL – graus de liberdade; QM – quadrado médio; e F – teste F.

Apesar de Larcher (2006), Davies (2006) e Köner (2006) citarem que ocorre redução na condutância estomática das folhas devido ao estresse hídrico, o que consequentemente aumenta a temperatura foliar, não ocorreram diferenças significativas (Tabela 2.13) nas temperaturas foliares para a subparcela (S). Possivelmente, pode ter ocorrido aclimação estomática das plantas, não ocorrendo redução na condutância, pois, similar à aclimação fotossintética em altas [CO<sub>2</sub>], quando as plantas ficam expostas por longos períodos, como as plantas deste experimento, a condutância estomática também tem aclimação (Ziska e Bunce, 2006). Desta forma, procedeu-se o teste de médias de Tukey somente para as parcelas (P), ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 2.14).

Tabela 2.14 – Teste de médias de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para as temperaturas foliares (°C) média, máxima e mínima, em que médias na mesma coluna seguidas pela mesma letra são iguais

P	Temperatura foliar média (°C)	Temperatura foliar máxima (°C)	Temperatura foliar mínima (°C)
1	21,65 <sup>A</sup>	26,21 <sup>A</sup>	17,11 <sup>A</sup>
2	21,54 <sup>A</sup>	25,80 <sup>A</sup>	17,16 <sup>A</sup>
3	19,65 <sup>B</sup>	23,56 <sup>B</sup>	15,55 <sup>B</sup>

As maiores temperaturas foliares média, máxima e mínima ocorreram nas parcelas que receberam as câmaras, P1 e P2 (Tabela 2.14), ambas apresentando diferença significativa em relação à parcela testemunha, P3. Para a temperatura foliar média, o aumento em P1 e P2 em relação a P3 foi 1,94°C em média, enquanto para a temperatura foliar máxima foi, em média, 2,45°C e 1,59°C para a temperatura foliar mínima. Essas maiores temperaturas de P1 e P2 ocorreram devido a maiores temperaturas das câmaras (Figura 2.7). Entretanto, como se observa na Tabela 2.14, não ocorreram diferenças significativas entre P1 e P2 em todas as temperaturas foliares (média, máxima e mínima). Tal fato não era esperado, pois Larcher (2006) observa que o aumento da [CO<sub>2</sub>] reduz a condutância estomática, o que consequentemente aumenta a temperatura foliar, fato não observado na Tabela 2.14. Como também, o aumento da temperatura foliar em P2, não resultou maiores taxas fotossintéticas (Tabela 2.7).

Nas tabelas 2.15 e 2.16, são apresentadas as alterações (%) de cada tratamento em relação ao tratamento controle (P3S1), juntamente com as médias, desvios padrões e

coeficientes de variações de cada tratamento para as variáveis fenológicas analisadas. Na Tabela 2.17, são apresentadas as Anovas para as mesmas variáveis fenológicas analisadas.

Tabela 2.15 – Alterações (Alter.) de cada tratamento em relação ao tratamento controle (P3S1), médias, desvios padrões e coeficientes de variações (C.v.) de cada tratamento para as variáveis fenológicas analisadas: número de grãos por vagem, peso de 100 grãos e peso total dos grãos

Trat.	Nº de grãos por vagem				Peso de 100 grãos (g)				Peso total dos grãos (g)			
	Média	Desvio padrão	C.v. (%)	Alter. (%)	Média	Desvio padrão	C.v. (%)	Alter. (%)	Média	Desvio padrão	C.v. (%)	Alter. (%)
P1S1	4,84	0,15	3,02	-7,91	23,48	0,96	4,07	4,66	478,23	35,35	7,39	19,46
P1S2	3,39	0,33	9,67	-35,45	21,95	2,40	10,94	-2,17	154,96	33,81	21,82	-61,29
P2S1	5,13	0,39	7,64	-2,36	24,61	0,86	3,49	9,70	417,14	33,34	7,99	4,20
P2S2	3,59	1,05	29,22	-31,59	22,78	5,37	23,59	1,51	170,59	82,56	48,39	-57,39
P3S1	5,25	0,27	5,22	0,00	22,44	1,39	6,19	0,00	400,33	21,05	5,26	0,00
P3S2	4,46	0,58	13,05	-15,18	23,16	1,84	7,93	3,23	270,82	40,26	14,87	-32,35

Tabela 2.16 – Alterações (Alter.) de cada tratamento em relação ao tratamento controle (P3S1), médias, desvios padrões e coeficientes de variações (C.v.) de cada tratamento para as variáveis fenológicas analisadas: número de grãos, número de vagens e matéria seca total

Trat.	Nº de grãos				Nº de vagens				Matéria seca total (g)			
	Média	Desvio padrão	C.v. (%)	Alter. (%)	Média	Desvio padrão	C.v. (%)	Alter. (%)	Média	Desvio padrão	C.v. (%)	Alter. (%)
P1S1	2035,37	98,23	4,83	13,90	420,75	17,29	4,11	23,66	968,70	77,04	7,95	25,87
P1S2	701,76	105,23	14,99	-60,73	209,75	45,65	21,77	-38,35	672,84	83,45	12,40	-12,57
P2S1	1697,08	158,25	9,33	-5,03	332,25	39,76	11,97	-2,35	771,56	63,46	8,22	0,26
P2S2	732,22	278,77	38,07	-59,02	206,00	52,77	25,62	-39,46	614,06	99,85	16,26	-20,21
P3S1	1786,98	101,49	5,68	0,00	340,25	11,38	3,35	0,00	769,59	35,45	4,61	0,00
P3S2	1166,00	107,02	9,18	-34,75	263,25	22,54	8,56	-22,63	582,40	52,05	8,94	-24,32

Tabela 2.17 – Anova para o número de grãos por vagem, peso de 100 grãos, peso total dos grãos, número de grãos, número de vagens e matéria seca total

		Nº grãos por vagem	Peso de 100 grãos	Peso total dos grãos	Nº de grãos	Nº vagens	Matéria seca total
FV	GL	F	F	F	F	F	F
Bloco	3	0,08 <sup>NS</sup>	1,27 <sup>NS</sup>	2,06 <sup>NS</sup>	0,60 <sup>NS</sup>	1,56 <sup>NS</sup>	1,62 <sup>NS</sup>
P	2	3,52 <sup>NS</sup>	0,30 <sup>NS</sup>	2,76 <sup>NS</sup>	13,72 <sup>*</sup>	7,09 <sup>*</sup>	7,81 <sup>*</sup>
Erro (a)	6						
S	1	25,36 <sup>*</sup>	0,89 <sup>NS</sup>	134,99 <sup>*</sup>	143,29 <sup>*</sup>	66,94 <sup>*</sup>	107,47 <sup>*</sup>
P x S	2	0,86 <sup>NS</sup>	0,74 <sup>NS</sup>	7,88 <sup>*</sup>	6,41 <sup>*</sup>	5,38 <sup>*</sup>	4,17 <sup>NS</sup>
Erro (b)	9						
Total	23						

em que: NS – não significativo a 5% de probabilidade; \* - significativo a 5% de probabilidade; FV – fator de variação; GL – graus de liberdade; QM – quadrado médio; e F – teste F.

O número de grãos por vagem apresentou diferenças significativas para a aplicação do estresse hídrico, S (Tabela 2.17), com S1 (5,07 grãos por vagens) diferente de S2 (3,81 grãos por vagens). O peso total dos grãos (g), número de grãos e vagens apresentaram diferenças significativas para a interação entre a parcela e a subparcela (P x S); assim, procedeu-se o desdobramento da Anova e o teste de médias de Tukey para os tratamentos. A matéria seca total da parte aérea (g) apresentou diferenças significativas para a parcela (P) e a subparcela (S); assim, procedeu-se o teste de médias de Tukey separadamente para cada um. Quanto ao peso de 100 de grãos (g), não apresentou diferenças significativas, o que indica que os

tratamentos aplicados não influenciaram o enchimento dos grãos, pois, os mesmos não apresentaram diferenças unitárias de peso. Este resultado pode ser corroborado na Tabela 2.15, em que as alterações em relação a P3S1 foram pequenas.

O peso de 100 grãos é uma medida padrão para verificar a variação unitária de cada grão, principalmente quanto à influência de cada tratamento no peso de cada grão. Desta forma, como os tratamentos apresentaram diferenças significativas para o número de grãos e vagens, mas não para o peso de 100 grãos (Tabela 2.17), o aumento da [CO<sub>2</sub>] e o estresse hídrico não afetam o peso do grão em si, mas a produção de flores e vagens na planta.

Observaram-se reduções no número de grãos por vagem de até -35,45% para P1S2, em relação a P3S1 (Tabela 2.15), enquanto, na subparcela prejudicada pela precipitação (P3S2), a redução foi menor, -15,18%, em relação a P3S1. Este resultado difere daqueles citados por Silveira e Stone (2008), que não apresentaram redução no número de grãos por vagens. Nem as maiores taxas fotossintéticas apresentadas pelas plantas sob alta [CO<sub>2</sub>] (Tabela 2.7) não refletiram, ou mesmo, mantiveram a mesma quantidade de grãos por vagens. Entretanto, estes menores valores são reflexos do número de vagens sem sementes encontradas nas plantas submetidas ao estresse hídrico.

As variáveis peso total dos grãos, número de grãos e número de vagens apresentaram diferenças significativas nos desdobramentos das Anovas ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 2.18), com exceção de alguns desdobramentos que não apresentaram diferenças significativas. Na Tabela 2.19, são apresentados os testes de média de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para as variáveis: peso total dos grãos, número de grãos e número de vagens.

Tabela 2.18 – Desdobramento da Anova das variáveis peso total dos grãos, número de grãos e número de vagens entre os níveis da parcela na subparcela e também entre os níveis da subparcela na parcela

FV	GL	Peso total dos grãos	Nº de grãos	Nº vagens
		F	F	F
S / P1	1	86,54 *	89,72 *	52,10 *
S / P2	1	50,34 *	46,97 *	18,65 *
S / P3	1	13,89 *	19,43 *	6,94 *
P / S1	2	3,44 <sup>NS</sup>	4,42 *	7,49 *
P / S2	2	8,08 *	9,69 *	3,21 <sup>NS</sup>

em que: NS – não significativo a 5% de probabilidade; \* - significativo a 5% de probabilidade; FV – fator de variação; GL – graus de liberdade; e F – teste F.

Com os resultados obtidos pelo teste de média de Tukey (Tabela 2.19), verificou-se que as plantas de P1S1, P2S1 e P3S1 apresentaram maior peso total dos grãos (g), não apresentando diferenças significativas entre estes tratamentos com plantas não submetidas ao estresse hídrico. Os menores valores de peso total dos grãos (g) foram obtidos por P1S2, P2S2 e P3S2, todos os tratamentos com plantas submetidas a estresse hídrico. Com maior redução de P1S2 em relação a P3S1, -60,58% (Tabela 2.15), maior do que a redução de -42% encontrada por Silveira e Stone (2008). Enquanto, P3S2 apresentou diferença significativa em relação a P1S2, em virtude do problema ocorrido com a precipitação (Figura 2.9).

Tabela 2.19 – Teste de médias de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para as variáveis peso total dos grãos (g), número de grãos e número de vagens, em que médias na coluna seguidas pela mesma letra são iguais

Trat.	Peso total dos grãos (g)	Nº de grãos	Nº vagens
P1S1	478,23 <sup>A</sup>	2035,50 <sup>A</sup>	420,75 <sup>A</sup>
P3S1	400,33 <sup>A</sup>	1786,80 <sup>A</sup>	340,25 <sup>A B</sup>
P2S1	417,14 <sup>A</sup>	1697,30 <sup>A</sup>	332,25 <sup>B</sup>
P3S2	270,82 <sup>B</sup>	1166,00 <sup>B</sup>	263,25 <sup>B C</sup>
P2S2	170,59 <sup>B C</sup>	732,30 <sup>C</sup>	206,00 <sup>C</sup>
P1S2	154,97 <sup>C</sup>	701,80 <sup>C</sup>	209,75 <sup>C</sup>

O acréscimo obtido no peso total dos grãos pelo aumento da [CO<sub>2</sub>], 19,46% (P1S1), é inferior aos obtidos por Oliveira (2007) e Costa *et al.* (2009), 114,66%, para simulações com a mesma [CO<sub>2</sub>] no ambiente para o ano de 2080. Em razão dos modelos não apresentarem o efeito da aclimatação fotossintética, como também, os mesmos ainda são muitos estáticos, diferentes dos sistemas biológicos que são mais dinâmicos. Com isto, se destaca a importância de experimentos de campo para calibrar, ou aferir, os modelos de simulação de crescimento de culturas.

Para o número de grãos os resultados foram similares ao do peso total dos grãos (Tabela 2.19), em que somente P3S2 diferenciou dos demais tratamentos para as plantas submetidas a estresse hídrico. O motivo é o mesmo, porém nesta variável é mais acentuada a influência que a precipitação causou no tratamento. Já no número de vagens, P1S1 apresentou diferenças significativas em relação a P2S1 (Tabela 2.19), segundo Jablonski *et al.* (2002) e Ziska e Bunce (2006), aumentos da [CO<sub>2</sub>] afetam a reprodução, pois aumenta o número de flores e a produção de pólen, conseqüentemente aumenta o número de vagens. Enquanto os demais tratamentos apresentaram resultados similares ao do peso total dos grãos, para o número de vagens.

Apesar da taxa fotossintética de P1S2 ter sido mais alta do que as dos demais tratamentos com estresse hídrico (Figura 2.10), por causa da maior [CO<sub>2</sub>], isto não garantiu ganho no peso total dos grãos, ou mesmo, amenizou os efeitos do estresse hídrico. A razão deste fato é em virtude do abortamento de flores e vagens causadas pelo estresse hídrico, como pode ser observada pelo número de vagens menores nos tratamentos com estresse hídrico, na Tabela 2.19. Pois, segundo Davies (2006) e Silveira e Stone (2008), quando o estresse hídrico ocorre em estádios importantes da planta, como a floração, as perdas na produtividade são consideráveis. Outro fato interessante a citar, é que a alta [CO<sub>2</sub>] e o estresse hídrico não afetaram o peso unitário dos grãos, como pode ser observado na Tabela 2.17, pela variável peso de 100 grãos. Mas a alta [CO<sub>2</sub>] aumentou a produtividade, apesar de não significativa – esta vinculada ao maior número de vagens (Tabela 2.19). Estes resultados não significativos do tratamento P1S1 em relação aos demais, apesar dos maiores valores para peso total dos grãos, número de grãos e vagens, possivelmente são oriundos do baixo número de repetições aplicados aos tratamentos.

Outra suspeita para o efeito da alta [CO<sub>2</sub>] não ter amenizado os efeitos do estresse hídrico na produção de grãos, além do abortamento de flores e vagens, é a aclimação estomática. Este premissa de amenização dos efeitos do estresse hídrico na produção de grãos é oriunda do uso mais eficiente da água (Pritchard e Amthor, 2005; e Davies, 2006), porém devido à aclimação da condutância estomática, este uso mais eficiente da água é reduzido ao longo do tempo de exposição à alta [CO<sub>2</sub>] (Ziska e Bunce, 2004). Além disto, muito do conhecimento atual sobre o uso eficiente da água na literatura é a partir de experimentos com plantas individuais, em que as mensurações são somente a nível foliar, sendo que a planta toda apresenta resposta diferente. Pois com o aumento da [CO<sub>2</sub>], altera-se também a morfologia da planta, aumentando a área foliar e a matéria seca, como pode ser observado na Tabela 2.20. Com o aumento da área foliar, a quantidade de água perdida aumenta, em vista da maior taxa de transpiração por área, denotando assim outra possibilidade da alta [CO<sub>2</sub>] não ter atenuado os efeitos do estresse hídrico.

Tabela 2.20 – Teste de médias de Tukey ao nível de 5% de probabilidade da matéria seca total da parte aérea (g), para parcela (P) e subparcela (S), em que médias na coluna seguidas pela mesma letra são iguais

P	Médias	S	Médias
1	820,77 <sup>A</sup>	1	836,62 <sup>A</sup>
2	692,81 <sup>B</sup>	2	623,10 <sup>B</sup>
3	676,00 <sup>B</sup>		

A quantidade total de matéria seca da parte aérea foi maior para as plantas da parcela P1, refletindo as maiores taxas fotossintéticas (Tabela 2.7), como também para as plantas não submetidas ao estresse hídrico, S1 (Tabela 2.20). Diferente das demais variáveis, na matéria seca total da parte aérea, a subparcela prejudicada pelas precipitações (P3S2), apresentou as maiores reduções, em relação a P3S1, -24,32% (Tabela 2.16). A razão para esta resposta diferente, das demais variáveis, é que a perda de folhas durante o estresse hídrico foi maior em P3S2, como também o ganho em matéria seca para as plantas em P1. O ganho de matéria seca em P1, em relação à P3, foi de 20,88% (Tabela 2.16), enquanto, Poorter e Navas (2003) e Ainsworth e Long (2005), obtiveram ganhos em geral da matéria seca para plantas C<sub>3</sub> na faixa entre 45 à 49%. Esta maior quantidade de matéria seca em P1, em relação às demais, é oriunda do maior peso de grãos em conjunto com maior área foliar e caules que a planta desenvolveu ao longo da exposição às altas [CO<sub>2</sub>]. Reflexo das maiores taxas fotossintéticas das plantas expostas à alta [CO<sub>2</sub>] no ambiente (Tabela 2.7), das maiores temperaturas foliares (Tabela 2.14) dentro das câmaras, e da proteção física contra pragas e demais injúrias que as câmaras proporcionavam as plantas.

Com relação às observações de Prichard e Amthor (2005) e Ziska e Bunce (2006), na qual elevadas [CO<sub>2</sub>] permitem maiores taxas fotossintéticas, ou mesmo a manutenção da taxa, em plantas sob estresse hídrico. As maiores taxas fotossintéticas do presente trabalho não garantiram manutenção ou aumento da matéria seca da parte aérea e produção de grãos, para as plantas sob estresse hídrico (tabela 2.15 e 2.16).

As plantas de feijão também sofreram alterações no seu ciclo. No estágio vegetativo (estádios V0 à V4) as plantas de P1 e P2 se desenvolveram mais rapidamente do que as plantas

do tratamento controle, P3, devido às maiores temperaturas foliares (Tabela 2.14), fato que corrobora com as observações de Menzel e Sparks (2006). Porém, esta diferença diminuiu quando as plantas chegaram ao estágio reprodutivo (estádios R5 e R6 – abertura das flores). Já as plantas que não foram submetidas ao estresse hídrico, chegaram mais rapidamente ao estágio reprodutivo do que as plantas submetidas ao estresse hídrico.

Esta redução e prolongamento do ciclo das plantas podem ser observados na Figura 2.11, em que as imagens são do término do experimento. Na Figura 2.11A (tratamento P1S1) observam-se os efeitos do aumento da  $[CO_2]$  e da temperatura foliar na redução do ciclo. Enquanto, na Figura 2.11C (tratamento P3S1) observa-se o aspecto das plantas em seu ciclo normal. Já nas figuras 2.11B (tratamento P1S2) e 2.11D (tratamento P3S2), observam-se o prolongamento do ciclo da cultura quando as mesmas foram submetidas a estresse hídrico, com menor ciclo das plantas de P1S2 (Figura 2.11B) em relação à P3S2 (Figura 2.11D). O prolongamento do ciclo da cultura devido ao estresse hídrico, segundo Silveira e Stone (2008), ocorre quando o estresse é durante a floração, ao contrário de quando o estresse ocorre no enchimento dos grãos (R8), resultando em redução do ciclo.

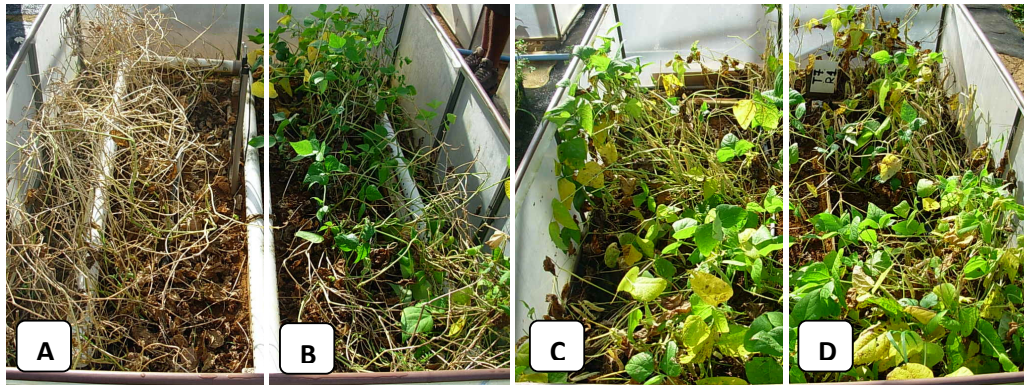


Figura 2.11 – Imagem ao final do experimento, mostrando a redução do ciclo das plantas pelo aumento da temperatura foliar nas plantas cultivadas dentro das câmaras e o prolongamento do ciclo das plantas em razão do estresse hídrico submetido: A - tratamento P1S1; B - tratamento P1S2; C - tratamento P3S1; D – tratamento P3S2.

Os efeitos do estresse hídrico podem ser observados na Figura 2.12. Onde se encontram vagens sem grãos desenvolvidos (Figura 2.12A), vagens e flores se desenvolvendo no final do ciclo da cultura (Figura 2.12B), abortamento de flores e vagens ao decorrer do estresse hídrico (Figura 2.12C) e senescência de folhas mais velhas ao decorrer do estresse hídrico (Figura 2.12D).

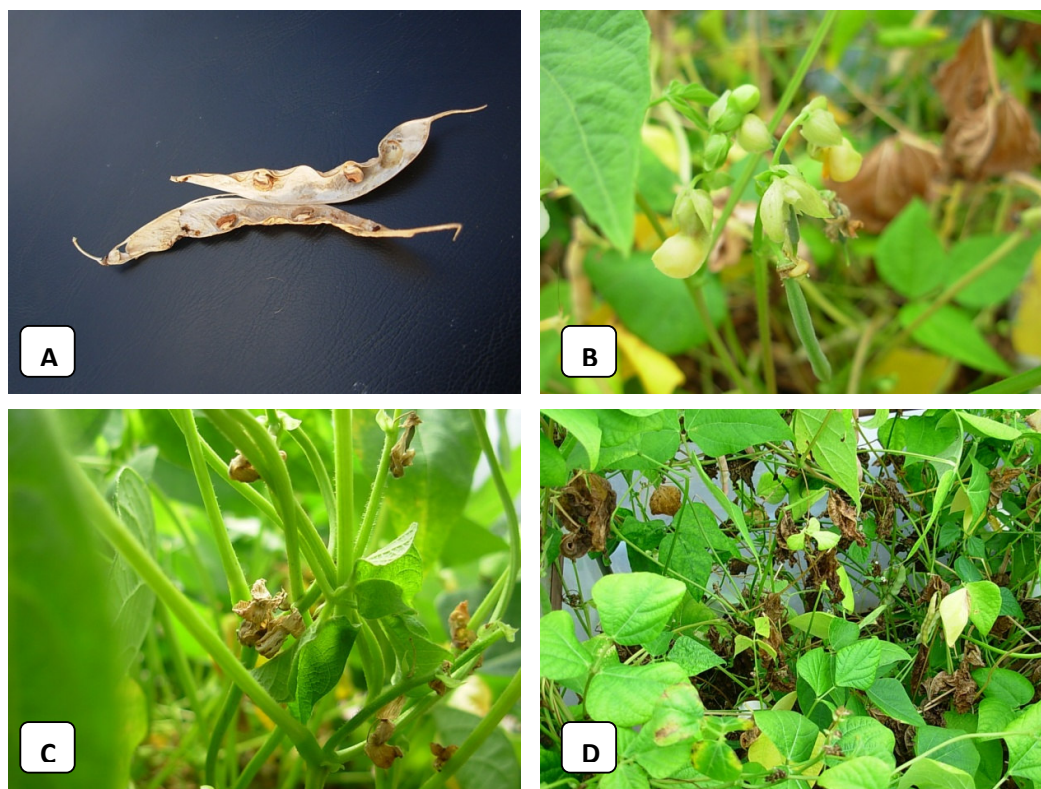


Figura 2.12 – Efeitos do estresse hídrico nas plantas: A – vagens formadas com grãos não preenchidos ou mal formados; B – formação de vagens e flores ao final do ciclo da cultura; C – abortamento de flores durante o estresse hídrico; e D – queda das folhas mais velhas durante o estresse hídrico.

## 2.5. CONCLUSÕES

Nas condições experimentais que este trabalho foi realizado, conclui-se:

- O maior limitante às taxas fotossintéticas do feijão é a  $[CO_2]$  ambiente, e não o teor de água no solo. Desta forma, o teor de água no solo não apresenta influência significativa na fotossíntese das plantas de feijão sob alta  $[CO_2]$ ;
- O aumento da  $[CO_2]$  proporciona aumento da concentração de solutos nas células das folhas, o que resulta em menor potencial osmótico. Contudo, este aumento da  $[CO_2]$  em plantas sob estresse hídrico, não auxilia em melhor ajuste osmótico;
- O aumento da  $[CO_2]$  proporciona aumento significativo na matéria seca total da parte aérea da planta, como também no número de vagens, devido à maior reprodução. Porém, maiores  $[CO_2]$  não acarretam maiores produtividades, pois o peso total de grãos não apresenta diferenças significativas. Diferente do estresse hídrico, que acarreta redução significativa, principalmente se o estresse ocorrer em fases importantes da planta, como o caso da floração e formação de vagens; e
- O aumento da temperatura foliar reduz o ciclo das plantas de feijão, enquanto o estresse hídrico na fase de floração aumenta o ciclo das plantas de feijão. Porém, o aumento da temperatura foliar não aumenta a taxa fotossintética.

## 2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aidar, M.P.M.; Martinez, C.A.; Costa, A.C.; Costa, P.M.F.; Dietrich, S.M.C.; Buckeridge, M.S. Effect of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on the establishment of seedlings of jatobá, *Hymenea coubaril* L. (Leguminosae, Caesalpinioideae). *Biota neotropica*, v. 2, nº 1, 2002. Disponível em: <[www.biotaneotropica.org.br](http://www.biotaneotropica.org.br)>. Acesso em: 24 ago. 2007.
- 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. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: 24 ago. 2007.
- Clark, H.; Newton, P. C. D.; Barker, D. J. Physiological and morphological responses to elevated CO<sub>2</sub> and soil moisture deficit of temperate pasture species growing in a established plant community. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 50, nº 331, p. 233 – 242, feb. 1999. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: 28 jun. 2007.
- 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. Disponível em: <[http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/cgi-bin/gw\\_46\\_4\\_2/chameleon](http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/cgi-bin/gw_46_4_2/chameleon)>. Acesso em: 24 out. 2007.
- Costa, L. C.; Justino, F.; Oliveira, I. J. C.; Sedyama, G. C.; Ferreira, W. P. M.; Lemos, C. F. Potential forcing of CO<sub>2</sub>, technology and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) yield in southeast Brazil. *Environmental Research Letters*, v. 4, p.1-10, 2009.
- Davies, W. J. Responses of plant growth and functioning to changes in water supply in a changing climate. In: Morison, J.; Morecroft, M. *Plant growth and climate change*. Blackwell Publishing, 2006, 213p.
- 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. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: 26 out. 2007.
- Idso, S. B. Three phases of plant response to atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment. *Plant Physiology*, v. 87, p. 5 - 7, 1988. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: 26 ago. 2007.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate change 1995: The IPCC scientific assessment*. Cambridge University Press: Cambridge, 1995. 572p. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 15 out. 2007.
- Jablonski, L. M.; Wang, X.; Curtis, P. S. Plant reproduction under elevated CO<sub>2</sub> conditions: a meta-analysis of reports on 79 crops and wild species. *New Phytologist*, v.156, p. 9-26, 2002. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: 27 out. 2007.

- 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. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: 29 out. 2007.
- Köner, C. Significance of temperature in plant life. In: Morison, J.; Morecroft, M. *Plant growth and climate change*. Blackwell Publishing, 2006, 213p.
- Lambrevia, 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. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: 26 ago. 2007.
- Larcher, W. *Ecofisiologia Vegetal*. Tradução: Carlos Henrique Britto de Assis Prado. São Carlos: RiMa, 2006. 531p.
- Lobo, F. A. *Alterações na assimilação e metabolismo do carbono em plantas de soja sob condições de atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub>*. Viçosa, MG: UFV, 2003, 105f. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003. Disponível em: <[http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/cgi-bin/gw\\_46\\_4\\_2/chameleon](http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/cgi-bin/gw_46_4_2/chameleon)>. Acesso em: 24 out. 2007.
- Menzel, A.; Sparks, T. Temperature and plant development: phenology and seasonality. In: Morison, J.; Morecroft, M. *Plant growth and climate change*. Blackwell Publishing, 2006, 213p.
- Newton, P.C.D.; Clark, H.; Bell, C.C.; Glasgow, E.M.; Interaction of soil moisture and elevated CO<sub>2</sub> on the above-ground growth rate, root length density and gas exchange of turves from temperate pasture. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 47, nº 299, p. 771 – 779, jun. 1996. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: 28 jun. 2007.
- 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. Disponível em: <[http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/cgi-bin/gw\\_46\\_4\\_2/chameleon](http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/cgi-bin/gw_46_4_2/chameleon)>. Acesso em: 24 out. 2007.
- Poorter, H.; Navas, M. L. Plant Growth and competition at elevated CO<sub>2</sub>: on winners, losers and functional groups. *New Phytologist*, v.157, p.175–198, 2003. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: 26 out. 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.
- Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez, V. H. *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação*. UFV, Editora da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1999, 360p.

- Samarakoon, A.B.; Gifford, R.M. Elevated CO<sub>2</sub> effects on water use and growth of maize in wet and drying soil. *Australian Journal of Plant Physiology*, v.23, p.53–62, 1996. Disponível em: <<http://www.isiknowledge.com>>. Acesso em: 20 jun. 2010.
- SAS. *User's guide*. Versão 8.0. Cary: SAS Institute Inc., 1999.
- Silveira, P. M.; Stone, L. F. Irrigação. In: Vieira, C.; Paula Júnior, T. J.; Borém, A. *Feijão*. UFV, 2ª edição, 2008, 600p.
- Siqueira, O. J. W.; Steinmetz, S.; Salles, L. A. B.; Fernandes, J. M. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: Embrapa. *Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira*. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP, 2001, p. 33 – 64.
- Souza, A. P. *A cana-de-açúcar e as mudanças climáticas: efeitos de uma atmosfera enriquecida em CO<sub>2</sub> sobre o crescimento, desenvolvimento e metabolismo de carboidratos de Saccharum ssp.* Campinas, SP: UNICAMP, 2007, 91f. Dissertação (Mestrado em Biologia Celular), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2007.
- Streck, N. A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature on crop growth, development, and yield. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.35, n.3, p.730-740, mai-jun, 2005.
- Taiz, L.; Zeiger, E. *Fisiologia Vegetal*. Artmed, 3ª edição, 2004, 820p.
- Tezara, W.; Mitchell, V.; Driscoll, S. P.; Lawlor, D. W. Effects of water deficit and its interaction with CO<sub>2</sub> supply on the biochemistry and physiology of photosynthesis in sunflower. *Journal of Experimental Botany*, v. 53, nº 375, p.1781 – 1791. 2002. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em: 28 jun. 2007.
- Wand, S. J. E.; Midgley, G. F.; Jones, M. H.; Curtis, P. S. Responses of wild C<sub>4</sub> and C<sub>3</sub> grass (*Poaceae*) species to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration: a metaanalytic test of current theories and perceptions. *Global Change Biology*, v. 5, p.723-741, 1995.
- Ziska, L. H.; Bunce, J. A. Plant responses to rising atmospheric carbon dioxide. In: Morison, J.; Morecroft, M. *Plant growth and climate change*. Blackwell Publishing, 2006, 213p.

## CONCLUSÕES GERAIS

As conclusões gerais obtidas pela comparação entre os resultados dos experimentos de milho e feijão sob altas concentrações de CO<sub>2</sub> realizados neste trabalho são:

- Apesar do estímulo fotossintético das plantas de feijão (planta tipo C<sub>3</sub>) serem maiores do que das plantas de milho (planta tipo C<sub>4</sub>) em ambiente enriquecido com CO<sub>2</sub>, o estímulo fotossintético das plantas de milho em ambiente enriquecido com CO<sub>2</sub> não é desprezível;
- O aumento da concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente não proporciona ganho na produtividade de grãos nas culturas de milho (planta tipo C<sub>4</sub>) e feijão (planta tipo C<sub>3</sub>), como também não proporciona ganho de matéria seca na cultura do milho, ao contrário da cultura do feijão, que apresenta ganho de matéria seca;
- O peso individual dos grãos da cultura de feijão e milho não se altera com o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente; e
- O aumento da temperatura foliar reduz somente o ciclo das plantas de feijão (C<sub>3</sub>), enquanto o ciclo das plantas de milho (C<sub>4</sub>) permanece inalterado.

## RECOMENDAÇÕES

- Possivelmente o fato de grande parte dos resultados relacionados a produção de grãos e matéria seca não ter apresentado diferenças significativas, se deve ao baixo número de repetições dos tratamentos. Assim, recomenda-se nos próximos trabalhos maior número de repetições aplicadas aos tratamentos;
- Em próximos trabalhos, recomenda-se que a escala de trabalho espacial seja maior, trabalhando com maiores áreas cultivadas, como também as medições da taxa fotossintética não fiquem somente a nível foliar; e
- Seria interessante desenvolver uma FACE ("Free Air Carbon Enrichment"), para aproximar mais os resultados à escala de campo e, também, eliminar os efeitos das câmaras nos experimentos.