

NATALIA DOS SANTOS RENATO

**MODELO DE CRESCIMENTO DAS CULTURAS DO MILHO E DO FEIJÃO  
EM CONDIÇÕES DE TEMPERATURA E CO<sub>2</sub> ATMOSFÉRICO ELEVADOS**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

R394m  
2013

Renato, Natalia dos Santos, 1984-

Modelo de crescimento das culturas do milho e do feijão em condições de temperatura e CO<sub>2</sub> atmosférico elevados / Natalia dos Santos Renato. – Viçosa, MG, 2013.  
xiv, 81 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Gilberto Chohaku Sedyama.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Produtividade agrícola. 2. Fotossíntese. 3. Dióxido de carbono. 4. Mudanças climáticas. 5. Milho. 6. Feijão. 7. Métodos de simulação. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 631.558

NATALIA DOS SANTOS RENATO

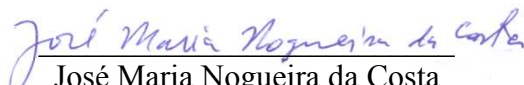
**MODELO DE CRESCIMENTO DAS CULTURAS DO MILHO E DO FEIJÃO  
EM CONDIÇÕES DE TEMPERATURA E CO<sub>2</sub> ATMOSFÉRICO ELEVADOS**

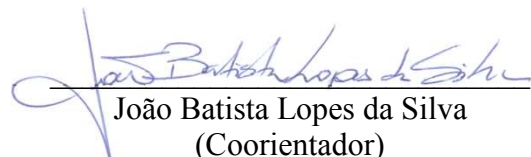
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

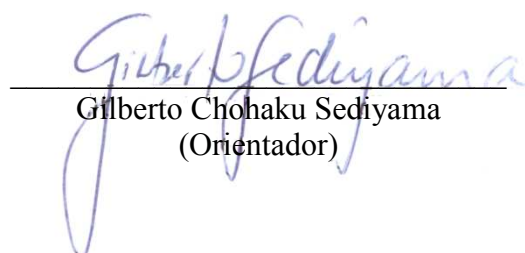
APROVADA: 30 de abril de 2013.

  
Williams Pinto Marques Ferreira

  
Welliam Chaves Monteiro da Silva

  
José Maria Nogueira da Costa

  
João Batista Lopes da Silva  
(Coorientador)

  
Gilberto Chohaku Sedyama  
(Orientador)

Aos meus pais

Paulo Renato e Maria Auxiliadora

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela presença em todos os momentos da minha vida; sem Ele nada seria possível;

Aos meus pais; Paulo Renato e Maria Auxiliadora, pelo exemplo de vida e apoio incondicional;

À minha Vó Rita, por todo amor, sempre torcendo por mim;

Aos meus irmãos, Bruno e Wilian, pela amizade e companheirismo;

Ao Alisson, sempre ao meu lado, pela compreensão, amor e carinho;

Ao professor Gilberto Sediama, pela orientação, pelos valiosos conselhos em todos os momentos e pela amizade;

Aos coorientadores Eduardo, pelo apoio e sugestões no decorrer do trabalho, e João Batista, pela ajuda em cada etapa da pesquisa, com muita dedicação, sempre à disposição. Ao professor Luiz Cláudio, pelo incentivo com o projeto;

A todos os professores e funcionários do programa de pós-graduação em Meteorologia Agrícola que contribuíram para minha formação;

Aos meus primos e meus amigos que durante esta caminhada estiveram sempre me incentivado, alguns de perto, outros de muito longe, mas todos torcendo por um sucesso no final desta etapa;

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar este trabalho e a CAPES pela bolsa de estudos concedida;

A todos aqueles que me apoiaram, que apostaram em mim e que seguramente são os que mais compartilham desta alegria.

## CONTEÚDO

Lista de Tabelas .....	vi
Lista de Figuras .....	vii
Lista de Símbolos .....	x
Resumo .....	xiii
Abstract.....	xiv
<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>1</b>
Introdução.....	1
Objetivo Geral .....	4
Referências .....	4
<b>CAPÍTULO 1. Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão.....</b>	<b>6</b>
Resumo .....	6
Introdução.....	7
Material e Métodos.....	10
Resultados e Discussão.....	14
Conclusões.....	20
Referências .....	20
<b>CAPÍTULO 2. Modelo fotossintético para análise da resposta da cultura do milho em condições de temperatura e CO<sub>2</sub> elevados.....</b>	<b>22</b>
Resumo .....	22
Introdução.....	23
Objetivos.....	26
Material e Métodos.....	26
Resultados e Discussão.....	36
Conclusões.....	50
Referências .....	50

<b>CAPÍTULO 3. Resposta da cultura do feijoeiro (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) a condições de temperatura e CO<sub>2</sub> elevados, a partir de um modelo fotossintético</b> .....	54
Resumo .....	54
Introdução .....	55
Objetivos.....	58
Material e Métodos.....	58
Resultados e Discussão.....	69
Conclusões.....	76
Referências .....	77
<b>CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES</b> .....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1.	Ciclo em dias, das culturas do milho e do feijão, com as temperaturas elevadas de acordo com os métodos: GD1 - Arnold (1959); GD2 - Ometto (1981); GD3 - Snyder (1985); e GD4 - Dufalt (1985).....	17
Tabela 1.2.	Diferença, em dias, nos ciclos das culturas do milho e do feijão entre as temperaturas observadas e simuladas de acordo com os métodos: GD1 - Arnold (1959); GD2 - Ometto (1981); GD3 - Snyder (1985); e GD4 - Dufalt (1985).....	18
Tabela 2.1.	Equações para o cálculo dos graus-dia (GD) de acordo com o método proposto por Ometto (1981).....	33
Tabela 2.2.	Valores da taxa fotossíntese ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) simulados pelo modelo com a variação de $\text{CO}_2$ de 380 e 700 ppm.....	38
Tabela 2.3.	Matéria seca total e matéria seca dos grãos durante o experimento realizado em Viçosa e a simulação, com variações na concentração de $\text{CO}_2$ de 350 ppm a 700 ppm.....	39
Tabela 2.4.	Matéria seca total e matéria seca dos grãos do milho simulados pelo modelo em diferentes condições.....	48
Tabela 3.1.	Equações para o cálculo dos graus-dia (GD) de acordo com o método proposto por Ometto (1981).....	655

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1. Fluxograma básico para a estimativa da produtividade de uma cultura por um modelo de simulação.....9
- Figura 1.2. Temperaturas máximas ( $T_{maxOb}$ ) e mínimas ( $T_{minOb}$ ) de Viçosa-MG no ano de 2011 e temperaturas máximas ( $T_{maxSA}$ ) e mínimas ( $T_{minSA}$ ) simuladas com um aumento aleatório de 0 a 5°C nos valores observados de temperatura. ....13
- Figura 1.3. Simulação dos graus-dia acumulados (GDA -  $TdOb$ ) para a cultura do milho com temperaturas observadas de Viçosa-MG em 2011, de acordo com os métodos: GD1 - Arnold (1959); GD2 - Ometto (1981); GD3 - Snyder (1985) e GD4 - Dufalt (1985).....14
- Figura 1.4. Simulação dos graus-dia acumulados (GDA -  $TdOb$ ) para a cultura do feijoeiro com temperaturas observadas de Viçosa-MG em 2011, de acordo com os métodos: GD1 - Arnold (1959); GD2 - Ometto (1981); GD3 - Snyder (1985) e GD4 - Dufalt (1985).....15
- Figura 1.5. Simulação do acúmulo de graus-dia (GDA -  $TdSA$ ) para a cultura do milho com temperaturas simuladas, de acordo com os métodos: GD1 - Arnold (1959); GD2 - Ometto (1981); GD3 - Snyder (1985); e GD4 - Dufalt (1985).....16
- Figura 1.6. Simulação do acúmulo de graus-dia (GDA -  $TdSA$ ) para a cultura do feijoeiro com temperaturas simuladas, de acordo com os métodos: GD1 - Arnold (1959); GD2 - Ometto (1981); GD3 - Snyder (1985); e GD4 - Dufalt (1985).....17

Figura 2.1.	Fotos do experimento realizado por Silva (2010) com as culturas do milho condições de eventos extremos.....	27
Figura 2.2.	Temperaturas médias de Viçosa nos meses de outubro de 2008 a março de 2009.....	35
Figura 2.3.	Matéria seca total simulada pelo modelo para a cultura do milho ao longo dos dias, sob diferentes condições de CO <sub>2</sub> ambiente, 380 ppm e 700 ppm.....	40
Figura 2.4.	Taxas fotossintéticas simuladas levando-se em conta as temperaturas observadas e simuladas em Viçosa, no período de estudo.....	42
Figura 2.5.	Taxas respiratórias simuladas pelo modelo com a temperatura observada de Viçosa e com as temperaturas simuladas.....	43
Figura 2.6.	Perfil do desenvolvimento da matéria seca simulados pelo modelo com a temperatura observada em Viçosa durante o experimento e com as temperaturas simuladas.....	44
Figura 2.7.	Perfil do desenvolvimento dos grãos de milho simulados pelo modelo com a temperatura observada em Viçosa durante o experimento e com as temperaturas simuladas.....	45
Figura 2.8.	Produtividade final gerada pelo modelo de simulação com a temperatura observada em Viçosa durante o experimento e com as temperaturas aumentadas.....	46
Figura 3.1.	Fotos do experimento realizado por Silva (2010), com as cultura do feijoeiro em condições de aumento da concentração de CO <sub>2</sub> . (A) Início do experimento e (B) Experimento com as câmaras de CO <sub>2</sub> . .....	59
Figura 3.2.	Temperaturas médias de Viçosa nos meses de abril a julho de 2009. ....	67

Figura 3.3.	Taxas fotossintéticas simuladas, levando-se em conta as temperaturas observadas e simuladas em Viçosa.....	69
Figura 3.4.	Produtividade final gerada pelo modelo de simulação com a temperatura observada em Viçosa durante o experimento e com as temperaturas aumentadas e o tamanho de ciclo da cultura em cada simulação. ....	71
Figura 3.5.	Taxas fotossintéticas simuladas considerando a temperatura observada e as diferentes condições de concentração de CO <sub>2</sub> na atmosfera (380 ppm e 700 ppm). ....	72
Figura 3. 6.	Matéria seca total e matéria seca dos grãos (produtividade) medidas durante o experimento e simuladas pelo modelo nas condições de concentração de CO <sub>2</sub> atual (380 ppm) e aumentada (700 ppm). ....	74
Figura 3.7.	Matéria seca de grãos do feijoeiro simulada pelo modelo em diferentes condições.....	75

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha_2$ :	Eficiência quântica intrínseca da planta
$\phi$ :	Razão de carboxilação da PEP
$\phi_{2m}$ :	Eficiência máxima do transporte de elétrons na fotossíntese
$\theta$ :	Fator de convexidade para a resposta de $J_2$ à radiação fotossinteticamente ativa
$\tau$ :	Ponto de compensação da radiação fotossinteticamente ativa
AFE:	Área foliar específica
Ca:	Concentração de $\text{CO}_2$ atmosférico
Cc:	Concentração de $\text{CO}_2$ no sítio da Rubisco
Ci:	Concentração intercelular de $\text{CO}_2$
$D_j$	Energia de desativação
$E_g$ :	Respiração de crescimento ou taxa de eficiência de conversão
$E_{K_{mc}}$ :	Energia de ativação para o $K_{mc}$
$E_{K_{mo}}$ :	Energia de ativação para o $K_{mo}$
$E_{V_{cmax}}$ :	Energia de ativação para o $V_{cmax}$
$f_{cyc}$ :	Fração de transporte de elétrons do ciclo do fotossistema
$f_{pseudo}$ :	Fração de transporte de elétrons do ciclo pseudo
$f_Q$ :	Fração de transporte de elétrons que segue o ciclo Q
GD:	Graus-dia

GDA:	Graus-dia acumulado
h:	Número de prótons para a produção de 1 mol de ATP
I:	Lamela do cloroplasto
J <sub>2</sub> :	Taxa de transporte de elétrons
J <sub>max</sub> :	Razão máxima de J <sub>2</sub>
J <sub>max25</sub>	Limite superior de J <sub>2</sub> a 25 <sup>0</sup> C
K <sub>mc</sub> :	Constante de Michaelis-Mentem para o CO <sub>2</sub>
K <sub>mc25</sub> :	Constante de Michaelis-Mentem para o CO <sub>2</sub> a 25 <sup>0</sup> C
K <sub>mo</sub> :	Constante de Michaelis-Mentem para o O <sub>2</sub>
K <sub>mo25</sub> :	Constante de Michaelis-Mentem para o O <sub>2</sub> a 25 <sup>0</sup> C
n	Índice de nitrogênio da folha
nb	Conteúdo mínimo de nitrogênio da fola
O <sub>i</sub> :	Concentração de oxigênio intercelular
PF	Partição da matéria seca para as folhas
Pp:	Fotossíntese bruta
Q <sub>10</sub> :	Fator de incremento da manutenção
R:	Constante universal dos gases
Rm	Respiração de manutenção
rm	Coefficiente da respiração de manutenção
Tb:	Temperatura basal inferior
TB:	Temperatura basal superior

$T_m$ :	Temperatura média do ar
$V_c$ :	Taxa de carboxilação limitada pela enzima Rubisco
$V_{cmax}$ :	Capacidade máxima da enzima Rubisco para a realização da função carboxilase
$V_{cmax25}$ :	Capacidade máxima da enzima Rubisco para a realização da função carboxilase a temperatura de 25°C
$V_j$ :	Taxa de carboxiliação limitada pelo transporte de elétron
$W_{acum}$	Peso seco acumulado da cultura
$X_{jn}$	Fator de proporcionalidade

## RESUMO

RENATO, Natalia dos Santos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2013. **Modelo de crescimento das culturas do milho e do feijão em condições de temperatura e CO<sub>2</sub> atmosférico elevados.** Orientador: Gilberto Chohaku Sedyama. Coorientadores: Eduardo Gusmão Pereira, Flávio Barbosa Justino e João Batista Lopes da Silva.

Atualmente, mudanças nas temperaturas e nas concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera são motivo de grande preocupação. As atividades agrícolas, sem dúvida, podem ser altamente dependentes dessas condições climáticas. Nesse sentido, o presente estudo foi conduzido com o objetivo de construir um modelo de simulação para estudar os efeitos dessas condições climáticas nas taxas fotossintéticas e na produtividade das culturas do milho e do feijão, especialmente quanto às condições de temperatura e concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico elevadas. O modelo foi construído a partir das equações de fotossíntese propostas por Farquhar et al. e adaptadas por Yin e van Laar. A calibração foi feita utilizando os dados de experimentos conduzidos em Viçosa, nos anos de 2008/2009. Em uma primeira etapa, estudou-se o efeito da temperatura na duração do ciclo das culturas, com diferentes equações de graus-dia. Em seguida, após a finalização do modelo, foram simulados os efeitos de diferentes temperaturas e concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub> separadamente para o milho e o feijão. Para a cultura do milho foram obtidos os seguintes resultados: em diferentes condições de CO<sub>2</sub> (concentrações de 380 e 700 ppm) as taxas fotossintéticas foram semelhantes e a produtividade final apresentou um acréscimo de 5% com o CO<sub>2</sub> a 700 ppm. Em condições de acréscimos na temperatura de 1, 2, 3 e 5°C, observou-se aumento considerável nas taxas fotossintéticas. Quanto à produtividade, os resultados foram positivos até um acréscimo de 2°C. Entretanto, quando a simulação foi feita com temperaturas mais elevadas, acréscimos de 5°C, observou-se uma queda na produtividade de até 75%. Em relação à cultura do feijão, respostas distintas foram observadas. Verificou-se com as simulações, aumento nas taxas fotossintéticas e na produtividade final em condições de elevada concentração de CO<sub>2</sub> (700ppm); nesse caso, os ganhos com a produtividade chegaram a 35%. Entretanto, nas simulações com acréscimos na temperatura, as taxas fotossintéticas permaneceram constantes e observou-se uma queda na produtividade final. No caso do estudo com a temperatura, em ambas as culturas as quedas na produtividade estão relacionadas com o aumento das taxas respiratórias e com a diminuição do ciclo.

## ABSTRACT

RENATO, Natalia dos Santos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2013. **Model for maize and beans growing under high temperature and atmospheric CO<sub>2</sub> conditions.** Adviser: Gilberto Chohaku Sedyama. Co-advisers: Eduardo Gusmão Pereira, Flávio Barbosa Justino and João Batista Lopes da Silva.

Nowadays, climatic changes have become of great concern worldwide and agricultural activities certainly are certainly highly dependent on the climatic conditions. In this sense, this work was aimed to build a model to simulate the effects of climate conditions on the maize and beans yields as their photosynthetic rates, especially under high temperatures and high atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations. The model was built from the equations of photosynthesis proposed by Farquhar et al. and adapted by Yin and van Lar. Data from experiments conducted in Viçosa, within in 2008/2009 season was used for doing the calibration. Firstly, different equations of degree-days were used in order to predict the effect of temperature on the crops cycle times. Secondly, the effects of different temperatures and CO<sub>2</sub> concentrations were simulated separately for maize and beans crops. For maize the following results were obtained: under different CO<sub>2</sub> concentrations (380 and 700 ppm) photosynthetic rates were similar and maize yield grew by 5% with CO<sub>2</sub> equal to 700 ppm. Under conditions of temperature increases (1, 2, 3 and 5 °C), photosynthetic rates increased considerably. Regarding responses of maize yield under different temperature conditions, the results were positive to an increase of 2 °C. However, when the simulation was made with higher temperatures increment (5 °C), the yield decreased up to 75%. With regard to the results observed for bean crop, distinct responses were observed. Increments on photosynthetic rates and bean yield under high CO<sub>2</sub> concentration (700ppm) were noted. The yield gains reached up to 35%. However, regarding the temperature effects, photosynthetic rates remained constant whilst the bean yield decreased. For the study of the temperature in both crops (maize and beans), the productivity declines are related to the increment in respiration rates and with the decreases of the crops cycle times.

## INTRODUÇÃO GERAL

### INTRODUÇÃO

Atualmente, mudanças na temperatura e na concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera são motivo de grande preocupação mundial. Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), a temperatura média mundial já aumentou 0,6 °C nos últimos cem anos e aumentará entre 1,4 e 5,8°C até 2100 se as emissões de gases do efeito estufa - principalmente vapor de água, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> e CH<sub>4</sub> - permanecerem com os valores atuais. Esse aumento da temperatura poderá ser acompanhado pela elevação do nível do mar e por maior frequência e intensidade de ocorrência dos eventos extremos, como secas e inundações (IPCC, 2007).

Um setor que pode ser alvo de grandes alterações é o setor da agricultura, pois essa atividade é altamente dependente de fatores climáticos. Alterações no clima poderão causar queda na produção, encurtar o ciclo das culturas e representar antecipação nas épocas de semeadura e colheita, entre outros fatores (Agostinetto et al., 2002).

Especificamente neste trabalho, foram estudadas as respostas das culturas do milho (*Zea mays* L.) e do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) frente a simulações com alterações dos fatores climáticos. Essas culturas têm grande importância social e econômica para o Brasil, maior produtor mundial de feijão e o terceiro maior produtor mundial de milho. Segundo a CONAB (2013), a área para a produção brasileira de feijão diminuiu 8%, mas espera-se não haver quedas na produção média dos grãos, isso quando comparados com a primeira safra de 2012. As previsões apontam queda na produção de milho comparada com a safra de 2012 em 5,5%. Além disso, as culturas estudadas são fundamentais para segurança alimentar devido à grande preocupação

mundial com o crescimento populacional e da demanda por alimentos (Parry et al., 2004; FAO, 2004).

No campo da fisiologia vegetal, as culturas do milho e do feijão possuem características fotossintéticas diferentes e são classificadas em grupos fisiológicos distintos.

A cultura do feijão pertence ao grupo das plantas  $C_3$ , em que o primeiro produto estável da cadeia bioquímica da fotossíntese é uma molécula com 3 carbonos, o ácido 3-fosfoglicérico (3-PGA). Essa via fotossintética envolve um processo de carboxilação no qual uma molécula de  $CO_2$  é adicionada a uma molécula de ribulose 1,5 bisfosfato por meio da enzima Ribulose 1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco), no chamado ciclo de Calvin, que ocorre no estroma do cloroplasto (Taiz e Zieger, 2010).

A cultura do milho é uma cultura denominada de tipo  $C_4$ , uma vez que em seu mecanismo fotossintético produz-se como primeiro produto estável uma molécula de 4 carbonos, o ácido oxalacético. Essas plantas possuem anatomia diferenciada nas folhas: a bainha do feixe vascular apresenta-se como uma camada de células bem desenvolvidas, nas quais se encontra a enzima Rubisco. Uma segunda enzima carboxilativa, a fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPcase), é encontrada nas demais células do mesófilo foliar. Essa enzima realiza a carboxilação da molécula de fosfoenolpiruvato (PEP), formando o ácido oxalacético, imediatamente transformado em malato e aspartato. Nos cloroplastos das células da bainha, o aspartato e o malato são descarboxilados em  $CO_2$  e piruvato. O  $CO_2$  resultante é concentrado e utilizado pela Rubisco, suprimindo o processo de fotorrespiração e seguindo o ciclo de Calvin (Taiz e Zieger, 2010).

Por serem de grupos fotossintéticos diferentes, as culturas aqui estudadas podem responder de maneiras bem distintas às mudanças ambientais, como aumento de

temperatura e/ou concentração de CO<sub>2</sub>. O milho, por ser do grupo das plantas C<sub>4</sub>, pode apresentar pouco ou nenhum crescimento adicional em resposta às elevadas concentrações de CO<sub>2</sub>. Com relação à temperatura, estudos indicam um aumento nas taxas fotossintéticas e uma diminuição do ciclo da cultura (Marengo e Lopes, 2009). O feijoeiro é classificado como uma cultura do tipo C<sub>3</sub>, de ciclo curto. Apesar da sua ampla distribuição geográfica, a planta é pouco tolerante a fatores extremos do ambiente, sendo considerada uma cultura muito sensível às variações das condições ambientais. As temperaturas elevadas podem ser problemáticas para o cultivo do feijoeiro em muitas regiões do Brasil (Téran e Singh, 2002). Em relação aos efeitos do CO<sub>2</sub> elevado, poucos são os registros de pesquisas com as plantas do feijoeiro. Poorter e Navas (2003), por exemplo, observaram que plantas com mecanismo fotossintético C<sub>3</sub> apresentaram ganhos consideráveis de biomassa como resposta à elevação dos teores de dióxido de carbono.

Na tentativa de estudar tais comportamentos, a modelagem do crescimento de culturas tem sido uma ferramenta importante que vem ganhando destaque com os avanços nas técnicas computacionais. Os modelos geralmente abordam previsão de crescimento e desenvolvimento das culturas, assim como a interação delas com o meio ambiente.

Os modelos de simulação de crescimento de culturas normalmente seguem uma rotina, em que são calculados os ganhos energéticos da planta pelas taxas fotossintéticas; depois aplicam-se as penalizações com as respirações, sendo também de grande importância o cálculo das fases fenológicas da planta, até que se complete o ciclo da cultura.

De forma geral, poucos são os trabalhos que exploram o comportamento direto do clima na fotossíntese e posteriormente na produtividade das culturas. Esse fato pode

estar relacionado à dificuldade de implantação de experimentos em campo que mostrem o comportamento das culturas em condições extremas, assim como à dificuldade de medição de certos parâmetros (elevado custo e baixa precisão).

## **OBJETIVO GERAL**

Diante do exposto, o presente estudo foi conduzido com objetivo geral de estudar separadamente o comportamento da cultura do milho (C<sub>4</sub>) e do feijão (C<sub>3</sub>) em diferentes condições de temperatura e concentrações de CO<sub>2</sub> a partir do modelo fotossintético proposto por Farquhar et al. (1980) e adaptados por Yin e van Lar (2005).

## **REFERÊNCIAS**

AGOSTINETTO, D.; FLECK, N. G.; RIZZARDI, M. A.; BALBINOT JR. Potencial de emissão de metano em lavouras de arroz irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n° 6, p. 1073 – 1081, 2002.

CONAB: Companhia **Nacional de Abastecimento**. **Levantamento de produção**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>

FAO. **Food and Agriculture Organization**. Rice and narrowing the yield gap. London, 2004.

FARQUHAR, G.D., VON CAEMMERES, S. AND BERRY, J.A., A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. **Planta** 149, p. 78-90, 1980.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press: Cambridge, 2007.

MARENCO, R. A.; LOPES, N. **Fisiologia vegetal**. Viçosa Editora UFV, 486p, 2009

PARRY, M. L.; ROSENZWEIG, C.; IGLESIAS, A.; LIVERMORE, M.; FISCHER, G. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. **Global Environmental Change**, v.14, p.53-67, 2004.

POORTER H. E NAVAS M. L. Plant growth and competition at elevated CO<sub>2</sub> : winners ,losers and functional groups. **New Phytologist**, 157,175–198, 2003.

TÉRAN, H.; SINGH, S. P. Comparison of Sources and Lines Selected for Drought Resistance in Common Bean. **Crop Science** v. 42 p. 64-70, 2002.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 5.ed. Sunderland Sinauer Associates, 782 p, 2010.

YIN, X., VAN LAAR. H. H, **Crop Systems Dynamics an ecphysiological simulation model for genotype-by-environment interactions**, Wageningen Academic Publishers, The Netherlands, 2005.

## **CAPÍTULO 1**

# **INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS PARA CÁLCULO DE GRAUS-DIA EM CONDIÇÕES DE AUMENTO DE TEMPERATURA PARA AS CULTURAS DE MILHO E FEIJÃO**

### **RESUMO**

O presente estudo foi realizado com o objetivo de se avaliar diferentes métodos para o cálculo de graus-dia (GD). Foram comparados quatro métodos de soma térmica, frequentemente usados no cálculo de GD: método de Ometto, Snyder, Dufault e método residual de Arnold, considerando-se as culturas do milho e do feijão. As simulações foram feitas com as temperaturas observadas em Viçosa-MG no ano de 2011, e temperaturas simuladas (com acréscimo aleatório entre 0 a 5 °C em cada dia do período). As respostas dos quatro métodos de cálculo dos GD foram similares para as temperaturas observadas (reais). Para as temperaturas elevadas, os métodos não apresentaram respostas similares. Fixando os graus-dia em 1.600 para a cultura do milho e 1.300 para o feijão, os métodos estudados reduziram de forma diferente o ciclo das culturas. As maiores reduções foram obtidas pelo método Arnold e Snyder, diminuindo igualmente o ciclo em 28 e 17 dias para a cultura do milho e do feijão, respectivamente. No método de Ometto, foram observadas as menores reduções, de 12 dias para o milho e 11 para o feijão, pois, nesse caso, utilizam-se as temperaturas basal superior e inferior e considera-se uma penalização maior em dias que a temperatura máxima ultrapassa a temperatura basal.

**PALAVRAS-CHAVE:** Soma térmica, temperatura do ar, milho, feijão.

## **INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos, as mudanças climáticas têm sido motivo de grandes debates e o assunto tem gerado grande repercussão na comunidade científica internacional. Tais alterações podem estar relacionadas à variação do clima global ou regional ao longo do tempo. Segundo IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), a temperatura média mundial já aumentou 0,6 °C nos últimos cem anos e poderá aumentar entre 1,4 e 5,8 °C até 2100, se as emissões de gases do efeito estufa - principalmente vapor de água, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> e CH<sub>4</sub> - permanecerem com as emissões atuais. Esse aumento da temperatura poderá ser acompanhado pela elevação do nível do mar, por maior frequência e intensidade de ocorrência dos eventos extremos, como secas e inundações (IPCC, 2007).

Mais especificamente, especula-se que o aumento da temperatura do ar ocasionará redução na taxa fotossintética, elevação da respiração e transpiração, além da redução no ciclo das culturas, ocasionando perda de produção e produtividade. De uma forma geral, as condições climáticas futuras poderão gerar vários impactos na produtividade das culturas agrícolas (Lu et al. 2005; Zhang e Liu, 2005; Battisti e Naylor, 2009).

Para que possíveis efeitos supracitados sejam estudados, pesquisas com foco na modelagem de crescimento de plantas, ou culturas agrícolas têm sido conduzidas (Richter et al., 2005; Costa et al., 2009; Renato, 2009). Em todos os modelos, a questão do ciclo e desenvolvimento da cultura considerada são aspectos de suma importância, pois definem as mudanças fenológicas da planta e, conseqüentemente, os estádios de crescimento. Uma abordagem simples e muito usada para definir o estágio de desenvolvimento da cultura é o método conhecido como graus-dia (GD) desenvolvido por Arnold (1959).

O conceito de graus-dia parte do seguinte princípio: o desenvolvimento de uma espécie vegetal está relacionado com o meio em cada fase fenológica, ou o seu ciclo completo, e é controlado a partir da soma térmica diária necessária para cada estágio. Os valores de soma térmica são diferentes entre as variedades de plantas (Schöffel e Volpe, 2002), como também os métodos de cálculo para essa soma térmica ou GD (Arnold, 1959; Ometto, 1981; Snyder, 1985; Dufault, 1997).

Segundo Ometto (1981), existe uma temperatura mínima para acionar os dispositivos metabólicos da planta denominada de temperatura basal inferior ( $T_b$ ). Somente acima dessa temperatura a planta pode se desenvolver. O mesmo autor ressalta, contudo, que a planta também possui uma temperatura basal superior (TB), e que acima deste valor há um estancamento das atividades metabólicas, prejudicando seu desenvolvimento.

O método de Arnold (1959) considera somente  $T_b$ , enquanto os métodos propostos por Ometto (1981), Snyder (1985) e Dufalt (1997) também consideram que as plantas possuem uma temperatura basal superior.

O método de Arnold (1959) é o mais usado, por ser um método simples. Os graus-dia, nesse método, são calculados como a soma da diferença entre a temperatura média diária e a temperatura basal inferior de cada planta. A grande vantagem nesse caso é a simplicidade; porém, como desvantagem, cita-se o fato de esse método não considerar a temperatura basal superior.

Os valores de temperatura basal inferior e superior variam de acordo com o cultivar estudada. Alguns trabalhos também utilizam valores diferentes para cada etapa do desenvolvimento da planta (Souza 1996). Para a cultura do milho (*Zea mays* L.), por exemplo, normalmente é utilizado um valor de 10 °C como temperatura basal inferior e 32 °C como temperatura basal superior (Romano et al. 2005; Assis et al. 2006). Já para

a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), 10 °C para a temperatura basal inferior e 35 °C para a basal superior (Vieira et al. 1997; Miranda et al. 2010).

Os modelos de crescimento de plantas têm mostrado que em cenários de temperaturas muito elevadas, os ciclos das culturas diminuem, reduzindo a produtividade ( Streck et. al, 2006, Costa et al. 2009, Renato, 2009). Ao simular a produtividade da cultura do milho e feijão, para o cenário A2 do IPCC projetado pelo HadCM3 até o ano de 2080, observou-se uma queda na produtividade de até 39% para o feijoeiro e 31% para a cultura do milho, sendo um dos fatores de queda a redução do ciclo das culturas (Costa et al. 2009). Mearns et al. (1997), utilizando o modelo CERES-Wheat nos EUA, simulando um aumento de 2 °C na temperatura média, encontraram resultados que reduziram a produtividade média em 25% e o ciclo para o trigo (*Triticum* spp.).

De uma forma geral, os modelos de simulação fazem a estimativa da produtividade das culturas da seguinte forma: calcula-se a fotossíntese líquida e utilizam-se os graus-dia acumulados para fracionar os carboidratos acumulados nos diferentes órgãos da planta (Figura 1).

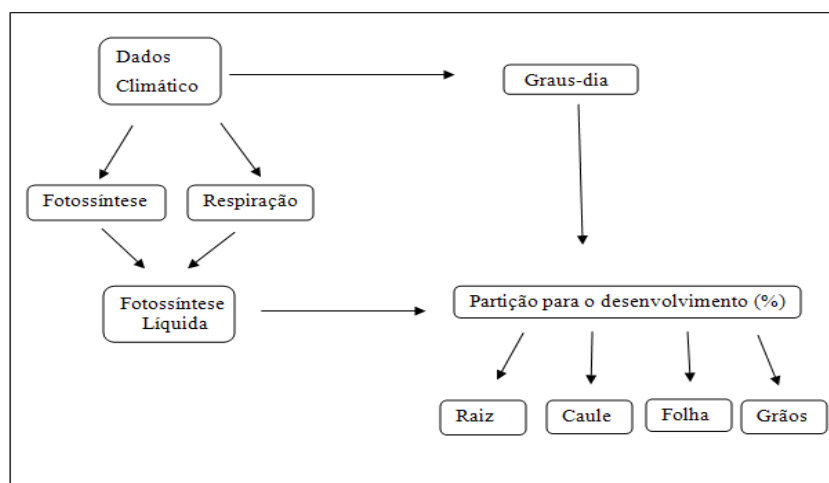


Figura 1.1. Fluxograma básico para a estimativa da produtividade de uma cultura por um modelo de simulação.

À medida que os graus-dia são acumulados, a planta passa por diferentes estádios, nos quais os coeficientes de partição também são distintos. O método para o cálculo do GD tem papel importante na estimativa da produtividade estimada pelos modelos de crescimento de plantas em cenários de mudanças climáticas, pois controlam o ciclo e desenvolvimento da cultura. Nesse sentido, o presente estudo foi realizado com o objetivo de se compararem os diferentes métodos de cálculo para GD na modelagem do ciclo das culturas do milho e feijão em cenários futuros com temperaturas elevadas.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

No presente estudo, foram avaliados quatro métodos de soma térmica, frequentemente usados no cálculo de GD: método residual de Arnold (1959), método de Ometto (1981), método de Snyder (1985) e método de Dufault (1997).

O método proposto por Arnold (1959) considera apenas a temperatura basal inferior ( $T_b$ ) na soma térmica dos graus-dia (Eq. 1.1).

$$GD = \frac{TM + Tm}{2} - T_b \quad (1.1)$$

Em que,

GD = graus-dia, °C

TM = temperatura máxima do dia, °C

Tm = temperatura mínima do dia, °C

Tb = temperatura basal inferior, °C

No método proposto por Ometto (1981), além de se considerar a temperatura basal inferior, considera-se também a temperatura basal superior (TB). Nesse método, a

soma térmica apresenta cinco condicionantes, cada uma com determinada equação (eq. 1.2 a 1.6) para cálculo de GD.

$$TB > TM > Tm > Tb \quad GD = \frac{TM - Tm}{2} + Tm - Tb \quad (1.2)$$

$$TB > TM > Tb > Tm \quad GD = \frac{(TM - Tb)^2}{2(TM - Tm)} \quad (1.3)$$

$$TB > Tb > TM > Tm \quad GD = 0 \quad (1.4)$$

$$TM > TB > Tm > Tb \quad GD = \frac{2(TM - Tm)(Tm - Tb) + (TM - Tm)^2 - (TM - TB)^2}{2(TM - Tm)} \quad (1.5)$$

$$TM > TB > Tb > Tm \quad GD = \frac{1}{2} \cdot \frac{(TM + Tb)^2 - (TM - TB)^2}{TM - Tm} \quad (1.6)$$

Em que

TB = temperatura basal superior, °C

O método proposto por Snyder (1985) também considera a temperatura basal superior e a inferior, porém apresenta somente quatro condições, com equações mais complexas (eq. 1.7 a 1.13).

$$TB > TM > Tm > Tb \quad GD = \frac{TM + Tm}{2} - Tb \quad (1.7)$$

$$TB > TM > Tb > Tm \quad GD = \frac{(M - Tb) \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) + W \cos(\theta)}{\pi} \quad (1.8)$$

$$\theta = \arcsen \left( \frac{Tb - M}{(W)} \right) \quad (1.9)$$

$$(1.10)$$

$$M = \frac{TM + Tm}{2} \quad W = \frac{TM - Tm}{2}$$

TM>TB>Tm>Tb

$$GD = M - Tb - \frac{(M - TB)\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) + W \cos(\phi)}{\pi} \quad (1.11)$$

$$\phi = \arcsen\left(\frac{TB - M}{W}\right)$$

(1.12)

TM>TB>Tb>Tm

$$GD = \frac{(M - Tb)\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) + W \cos(\theta)}{\pi} - \frac{(M - TB)\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) + W \cos(\phi)}{\pi} \quad (1.13)$$

Para o método proposto por Dufault (1997) existem apenas duas condições (eq. 1.14 e 1.15). Diferentemente dos métodos de Ometto (1981) e de Snyder (1985), nesse método não existe uma condição quando a temperatura mínima fica abaixo da temperatura basal inferior.

$$TB < TM \quad GD = \frac{TM - Tm}{2} - Tb \quad (1.14)$$

$$TB > TM \quad GD = \frac{(2TB - TM + Tm)}{2} - Tb \quad (1.15)$$

Para avaliar os modelos de Graus-dia foi utilizado o *software* Model Maker (ModelKinetix, 2001). Nas simulações foram considerados dois cenários: (i) temperaturas diárias observadas de janeiro de 2011 a maio de 2011 (TdOb); (ii) temperaturas diárias elevadas (simuladas com acréscimo de 0 a 5°C aleatoriamente nas temperaturas observadas - TdSA).

Os dados de entrada foram obtidos a partir de dados observados de temperatura máxima e mínima de Viçosa-MG, do ano de 2011, coletados com a estação automática

do município (20°45' S, 42° 52' W) pertencente ao INMET. Como as simulações foram feitas para observar o ciclo da cultura em condições de temperatura elevada (mudanças climáticas), foi desenvolvida, adicionalmente, uma sub-rotina, que acrescentava valores de 0 a 5°C de forma aleatória nos valores observados da temperatura para as condições de Viçosa (Figura 1.2).

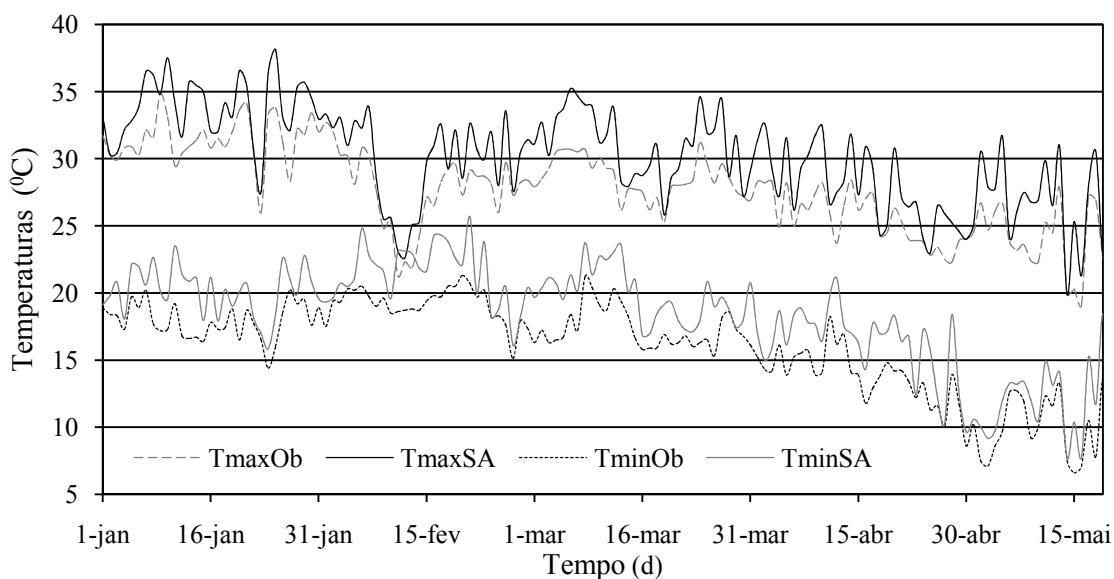


Figura 1.2. Temperaturas máximas (TmaxOb) e mínimas (TminOb) de Viçosa-MG no ano de 2011 e temperaturas máximas (TmaxSA) e mínimas (TminSA) simuladas com um aumento aleatório de 0 a 5°C nos valores observados de temperatura.

As temperaturas basais inferiores utilizadas no modelo para as culturas de milho e feijão foram 10°C. As temperaturas basais superiores foram de 32°C, para o milho e de 35°C para o feijão.

As simulações foram feitas para o ciclo fixo de 130 dias para a cultura do milho e 100 dias para a cultura do feijoeiro. Também foi realizada outra simulação com os graus-dia acumulados (GDA) fixo, com 1.600 GDA para a cultura do milho e 1.300 GDA para a cultura do feijoeiro.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a cultura do milho, que tem uma temperatura basal superior (TB) de 32<sup>0</sup> C, observou-se que as temperaturas máximas observadas (TmaxOb) mantiveram-se inferiores ao valor da TB em 90% do tempo. Já para a cultura do feijoeiro, que tem uma temperatura basal superior de 35<sup>0</sup> C, as temperaturas observadas (TmaxOb) não ultrapassaram tal limite (Figura 1.2). Dessa forma, os quatro modelos responderam de forma similar para a cultura do milho (Figura 1.3) e para o feijoeiro (Figura 1.4).

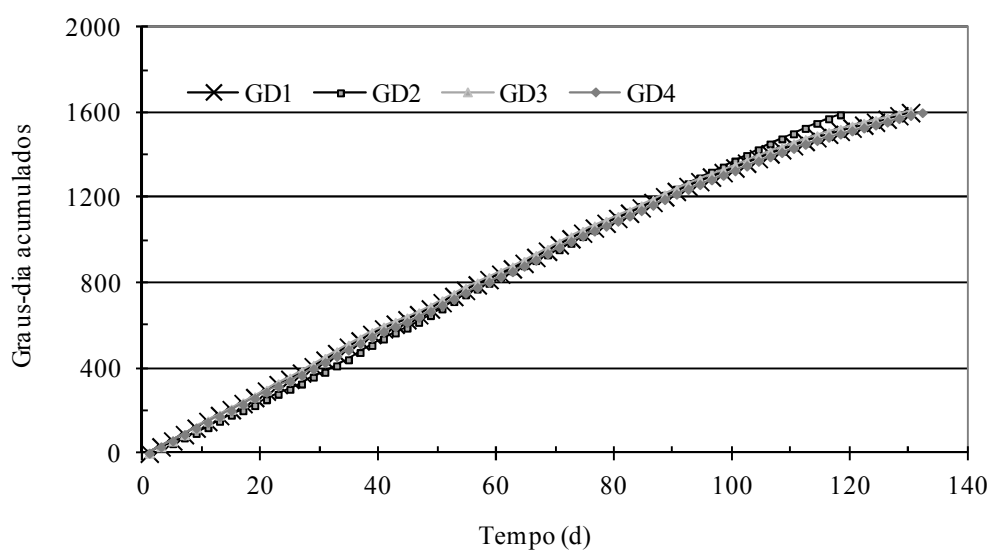


Figura 1.3. Simulação dos graus-dia acumulados (GDA - TdOb) para a cultura do milho com temperaturas observadas de Viçosa-MG em 2011, de acordo com os métodos: GD1 - Arnold (1959); GD2 - Ometto (1981); GD3 - Snyder (1985) e GD4 - Dufalt (1985).

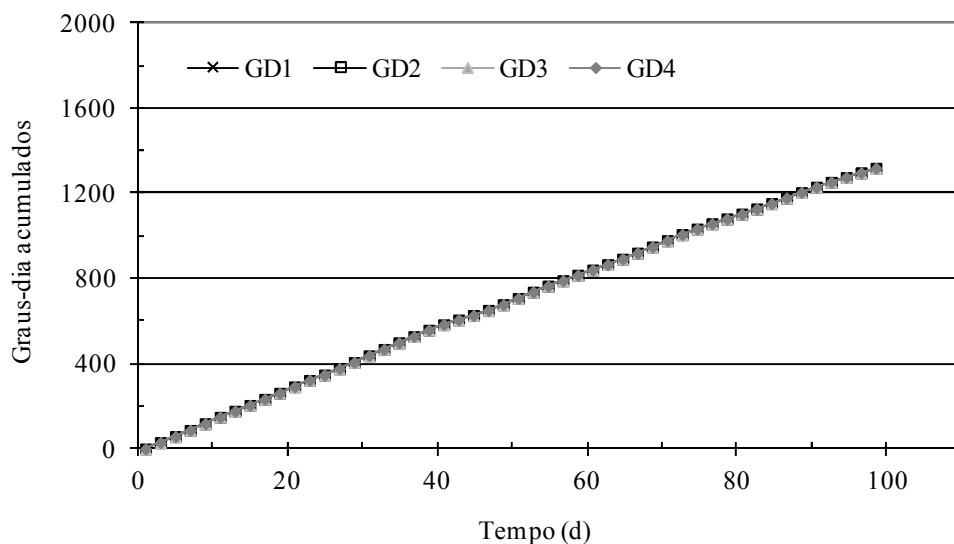


Figura 1.4. Simulação dos graus-dia acumulados (GDA - TdOb) para a cultura do feijoeiro com temperaturas observadas de Viçosa-MG em 2011, de acordo com os métodos: GD1 - Arnold (1959); GD2 - Ometto (1981); GD3 - Snyder (1985) e GD4 - Dufalt (1985).

As respostas dos quatro métodos de cálculo dos GD são similares para temperaturas observadas sem acréscimo (Figuras 1.3 e 1.4). No caso do feijoeiro, os quatro modelos de graus-dia completaram 1.300 graus-dia em 100 dias. Já na cultura do milho, o modelo completou 1.600 graus-dia em 130 dias com as equações de Arnold e Snyder, 132 dias com a equação de Dufalt, e 138 dias de acordo com a equação de Ometto. Esses resultados justificam o uso, na maioria dos modelos, da equação mais simples, proposta por Arnold, uma vez que um dos objetivos da modelagem é a representação de um sistema real da forma mais simplificada.

Entretanto, cabe ressaltar que em alguns trabalhos abordando o estudo das mudanças climáticas e seus impactos na agricultura, tem-se encontrado algumas dificuldades com o uso desta simplificação (Costa et al., 2009; Renato, 2009), pois os modelos de projeções atmosféricas têm apontado temperaturas muito elevadas para os cenários futuros (Mearns et al., 1997; Renato, 2009; Costa et al., 2009). Isso tem

resultado em uma redução muito drástica no ciclo das culturas com o uso do método de GD de Arnold (1959), uma vez que não prevê uma penalização por temperaturas acima da temperatura basal superior.

Para as temperaturas elevadas (TmaxSA), os métodos de cálculo de graus-dia não convergem mais para uma resposta similar no caso da cultura do milho (Figura 1.5). Nos dias em que os valores de temperaturas máximas foram maiores do que a temperatura basal superior, os modelos passaram a responder de forma diferente. Para o método proposto por Arnold (1959), por exemplo, quanto maior a temperatura média do dia, maior foi o acúmulo dos graus-dia, sem considerar um limite superior para esse acréscimo. Já para os outros métodos em dias com temperaturas maiores que a temperatura basal superior, a planta é submetida a uma penalização no acúmulo dos graus-dia. No caso do feijoeiro, a diferença foi um pouco menor, uma vez que tal cultura apresenta ciclo menor e temperatura basal superior maior (Figura 1.6).

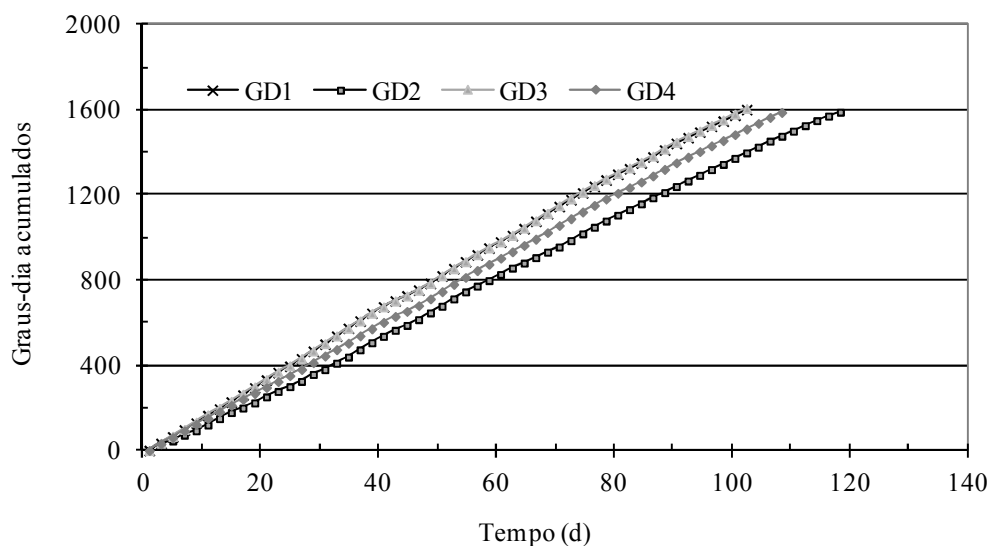


Figura 1.5. Simulação do acúmulo de graus-dia (GDA - TdSA) para a cultura do milho com temperaturas simuladas, de acordo com os métodos: GD1 - Arnold (1959); GD2 - Ometto (1981); GD3 - Snyder (1985); e GD4 - Dufalt (1985).

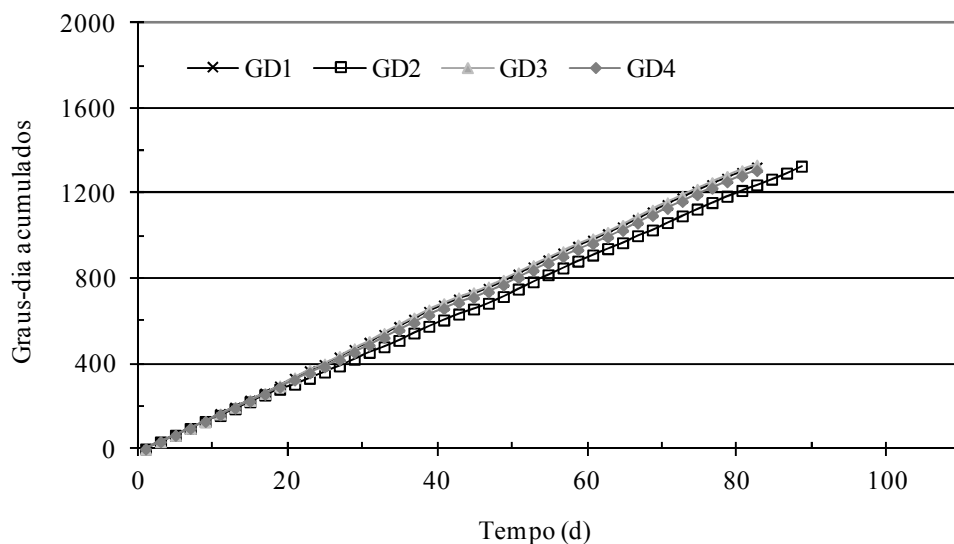


Figura 1.6. Simulação do acúmulo de graus-dia (GDA - TdSA) para a cultura do feijoeiro com temperaturas simuladas, de acordo com os métodos: GD1 - Arnold (1959); GD2 - Ometto (1981); GD3 - Snyder (1985); e GD4 - Dufalt (1985).

As simulações dos ciclos das culturas feitas com os graus-dia fixos e temperaturas elevadas (TdSA) apresentaram redução nos ciclos de ambas as culturas (Tabela 1.1). Nessas condições, os métodos considerados mostraram redução no ciclo de forma diferente (Tabela 1.2).

Tabela 1.1. Ciclo, em dias, das culturas do milho e do feijão, com as temperaturas elevadas de acordo com os métodos: GD1 - Arnold (1959); GD2 - Ometto (1981); GD3 - Snyder (1985); e GD4 - Dufalt (1985).

Cultura	GD1	GD2	GD3	GD4
Milho	102	118	102	107
Feijão	83	89	83	83

Tabela 1.2. Diferença, em dias, nos ciclos das culturas do milho e do feijão entre as temperaturas observadas e simuladas de acordo com os métodos: GD1 - Arnold (1959); GD2 - Ometto (1981); GD3 - Snyder (1985); e GD4 - Dufalt (1985).

Diferença do Ciclo (dias)	GD1	GD2	GD3	GD4
Milho	28	12	28	24
Feijão	17	11	17	17

Considerando-se que as culturas mantiveram o seu ciclo com os mesmos graus-dia, no método de Arnold (1959) e Snyder (1985), o ciclo diminuiu 28 e 17 dias para a cultura do milho e do feijão, respectivamente, pois ambos os métodos não apresentam penalidade severa ou nenhuma penalidade para as temperaturas acima da temperatura basal superior. Para o método de Dufalt (1985), que somente utiliza a temperatura basal superior, o ciclo diminuiu 24 e 17 dias para as culturas de milho e feijão, respectivamente. Já no método de Ometto (1981), essa redução foi menor, 12 e 11 dias, uma vez que tal método utiliza ambas as temperaturas basais, superior e inferior, e considera uma penalização maior em dias que a temperatura máxima ultrapassa os valores da TB.

Avaliando todos os métodos citados anteriormente, Lima et al. (2008) concluíram, em estudos com a cultura do café em condições de temperaturas observadas, que o método de Ometto (1981) foi o que melhor caracterizou a soma térmica (Graus-dia) para as cultivares estudadas (Acácia Cerrado e Rubi), corroborando com os resultados obtidos neste trabalho. Zucareli et al. (2010) estudaram a tendência do acúmulo de graus-dia e a produtividade para diferentes genótipos do milho para a cidade de Londrina-PR. Os autores obtiveram resultados diferentes para os diversos genótipos da cultura do milho. O acúmulo de graus-dia para completar o ciclo foi diferente para os diferentes genótipos estudados.

Percebe-se, portanto, que o maior problema do uso dos graus-dia na modelagem da produtividade agrícola em cenários de mudanças climáticas é que, geralmente, adota-se o método de Arnold (1956), fórmula mais simples dentre as disponíveis (Eq. 1) para se calcular a soma térmica da cultura. A equação citada, no entanto, não considera as temperaturas basal superiores, uma vez que a planta, quando submetida às temperaturas elevadas, tem sua soma térmica maior. Tal procedimento tem como resultado o cômputo do tempo do ciclo da cultura de forma reduzida, o que é irreal.

O método de Snyder (1985), apesar de considerar a temperatura basal superior, melhorando as simulações para o cenário de temperaturas elevadas, apresentou resultados similares ao método de Arnold (1959). Ademais, tal método é mais complexo, por exigir um número maior de cálculos.

No caso do método de Ometto (1981) (eq. 2 a 6), o efeito citado anteriormente na redução do ciclo da cultura é reduzido, uma vez que temperaturas muito elevadas não são mais somadas linearmente no desenvolvimento do ciclo das culturas. Para a cultura do milho, observa-se melhor simulação com o uso do método de Ometto (1981) em condições de temperatura elevadas, pois tal cultura possui ciclo maior e temperatura basal superior menor quando comparado com o feijoeiro.

Os resultados encontrados por Renato (2009) mostram grande diminuição no ciclo da cultura da cana-de-açúcar em cenários de mudanças climáticas utilizando temperaturas projetadas pelo modelo HADCM3 para o ano de 2020. Os cálculos foram feitos a partir do modelo de Arnold (1959), porém esse efeito seria visivelmente menor com o uso do modelo de Ometto (1981), visto que a cana-de-açúcar possui um ciclo longo, aproximadamente um ano.

## CONCLUSÕES

Em condições de temperaturas muito elevadas torna-se importante o uso de equações com limites inferiores e superiores que uma planta pode se desenvolver. Nas culturas estudadas, tanto para o milho quanto para o feijão, o método de Ometto (1981) é o mais indicado para as simulações, principalmente, em cenários de mudanças climáticas que projetam maiores temperaturas.

## REFERÊNCIAS

ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 74, n.1 p. 430-445, 1959

BATTISTI, D.S. e NAYTOR, R.I. Historical Warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat. **Science**, Washington, v. 323, n.5911, p. 240-244, 2009

COSTA, L. C.; JUSTINO, F.; OLIVEIRA, I. J. C.; SEDIYAMA, 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**, Bristol, v. 4, n.1, p.1-10, 2009.

DUFAULT, R. J. Determining heat unit requirements for broccoli in coastal South Carolina. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v.122, n.2, p.169-174, 1997.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press: Cambridge, 2007.

LUO, Q.; BELLOTI, W.; WILLIAMS, M.; BRYAN, B. Potential impact of climate change on wheat yield in South Australia. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.132, n.3-4 p. 273-285, 2005.

LIMA, E. P.; da SILVA, E. L. Temperatura base, coeficientes de cultura e graus-dia para cafeeiro arábica em fase de implantação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.3, p.266-273, 2008

MEARNS, L.O., ROSENZWEIG, C., GOLDBERG, R. Mean and variance change in climate scenarios: Methods, agricultural applications, and measures of uncertainty. **Climatic Change**, Dordrecht, v.35, n.4, p.367-96, 1997.

OMETTO, J. C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo: Agronômica Ceres 1981. 440p.

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.

RICHTER, G.M.; SEMENOV, M.A. Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales: assessing drought risks. **Agricultural Systems**, v. 84, p. 77-97, 2005.

SCHÖFFEL, E.R. & VOLPE, C.A. Relação entre a soma térmica efetiva e o crescimento da soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.1, p. 89-96, 2002.

SOUZA, A. Relações entre estádios fenológicos de três cultivares de arroz e graus-dia e dias de calendário para a microrregião de Dourados – MS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.1 n.1-2, p. 18-24, 1996.

STRECK, N. A.; ALBERTO, Cleber Maus. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília: v. 41, n. 9, p.1351-1359, 2006.

SNYDER, R. L. Hand calculating degree days. **Agriculture and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.35, n.1-4, p.353-358, 1985.

ZHANG, X. C.; LIU, W. Z. Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 131, 3-4, p.127-142, 2005.

## CAPÍTULO 2

### MODELO DE SIMULAÇÃO FOTOSSINTÉTICA PARA ANÁLISE DA RESPOSTA DA CULTURA DO MILHO( *Zea mays* L.) EM CONDIÇÕES DE TEMPERATURA E CO<sub>2</sub> ATMOSFÉRICO ELEVADOS

#### **RESUMO**

Objetivou-se no presente estudo testar um modelo de simulação para estudar os efeitos dessas condições climáticas nas taxas fotossintéticas e na produtividade da cultura do milho. Foi testado o modelo de fotossíntese proposto por Farquhar e adaptado por Yin e van Lar. O modelo foi implementado e calibrado utilizando os dados de experimentos conduzidos em Viçosa, nos anos de 2008 e 2009. Os resultados das taxas fotossintéticas simuladas nas diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> (380 e 700 ppm) foram semelhantes. Com relação à produtividade final de matéria seca (MS), observou-se um acréscimo de 5% quando a simulação foi feita com 700 ppm. Quando o modelo foi testado em condições com acréscimos de temperatura (+1, 2, 3 e 5°C), observou-se que as taxas fotossintéticas aumentaram consideravelmente quando a temperatura subiu, chegando a um limite, não apresentando mais ganhos quando a temperatura aumentou 5°C. Na produtividade, os resultados foram positivos nas primeiras simulações com acréscimos de até 2°C. Entretanto, quando foi feita a simulação para o cenário com temperaturas mais elevadas (3 e 5°C acima da média), a planta respondeu negativamente, com queda na produção. Além de aumentar as taxas respiratórias, o rápido acúmulo dos graus-dia no ciclo de crescimento simulado diminuiu o ciclo da cultura do milho, o que consequentemente resultou em menor tempo de crescimento e desenvolvimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** dióxido de carbono, fotossíntese, milho, temperatura do ar.

## INTRODUÇÃO

Atualmente, mudanças nas temperaturas e na concentração de CO<sub>2</sub> da atmosfera tem sido motivo de grande preocupação mundial. Tais alterações referem-se a anomalias do clima, em escala global ou regional ao longo do tempo. Devido a isso, a atividade agrícola, sem dúvida, pode sofrer grandes alterações, por ser altamente dependente de fatores climáticos. Alterações no clima poderão encurtar o ciclo das culturas e representar antecipação nas épocas de semeadura e colheita, entre outros fatores (Agostinetto et al., 2002).

Uma das culturas que podem ser prejudicadas é a cultura do milho (*Zea mays* L.), que tem grande importância social e econômica para o Brasil, o terceiro maior produtor mundial. Essa cultura é fundamental para segurança alimentar, devido à grande preocupação com o crescimento populacional e, conseqüentemente, com o aumento da demanda de alimentos (Parry et al., 2004 e FAO, 2004).

Com relação à fisiologia, o mecanismo fotossintético do milho produz como primeiro produto estável uma molécula de 4 carbonos, o ácido oxalacético, sendo considerado uma planta do tipo C<sub>4</sub>. Essas plantas possuem anatomia diferenciada nas folhas: a bainha do feixe vascular apresenta-se como uma camada de células bem desenvolvidas, nas quais se encontra a enzima Rubisco. Uma segunda enzima carboxilativa, a fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPcase), é encontrada nas demais células do mesófilo foliar. Ela realiza a carboxilação da molécula de fosfoenolpiruvato (PEP), formando o ácido oxalacético, transformado em malato e aspartato. Nos cloroplastos das células da bainha, o aspartato e o malato são descarboxilados em CO<sub>2</sub> e piruvato. O CO<sub>2</sub> resultante é concentrado e utilizado pela enzima ribulose 1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco), e seguindo o ciclo de Calvin (Taiz e Zeiger, 2010).

Em plantas  $C_4$ , as maiores taxas fotossintéticas são obtidas quando a temperatura do ar se encontra entre 30 e 40°C, sendo a faixa de temperatura ótima para o desenvolvimento da planta entre 20 e 30°C. Diferente das plantas  $C_3$ , que possuem apenas a Rubisco como carboxilase, as plantas  $C_4$  não apresentam fotorrespiração, uma vez que a PEPCase concentra o  $CO_2$  em torno da Rubisco, suprimindo sua atividade de oxigenase. Por esse motivo, o grupo de plantas  $C_4$  pode ser favorecido com o aumento de temperatura. Já o aumento na concentração de  $CO_2$  pode não implicar em elevação na taxa de fotossíntese líquida, pois, de uma forma geral, a planta  $C_4$  tem seu nível saturado com a concentração atual de  $CO_2$ .

O milho, por ser do grupo das plantas  $C_4$ , deve apresentar pouco ou nenhum crescimento adicional em resposta às elevadas concentrações de  $CO_2$  (Ghannoum et al., 2000). Nesse ponto, Leakey et al. (2004) afirmaram que os efeitos da alta concentração de  $CO_2$  nas plantas de milho não estão suficientemente compreendidos para permitir previsões futuras às mudanças climáticas.

Segundo Rudorff et al. (1996), não foram observados acréscimos na produtividade do milho cultivado em ambiente com concentração de  $CO_2$  próximo a 500 ppm. Entretanto, Leakey et al. (2004) encontrou com estudos experimentais que o milho em ambiente com elevada concentração de  $CO_2$  atmosférico (549 ppm) apresenta incremento médio de 10% na assimilação de  $CO_2$ .

Na busca pelo entendimento e quantificação da complexa interação entre o clima e as culturas agrícolas, têm-se observado um crescente aumento no desenvolvimento dos modelos de crescimento de culturas. Eles são baseados em fundamentos estatísticos ou em processos e também estão sendo utilizados para estudos da produtividade das culturas em cenários climáticos futuros (Easterling et al., 2001; Fao, 2004; Parry et al., 2004).

Phillips et al. (1996), utilizando o modelo EPIC, que simula cenários climáticos futuros de produtividade agrícola, encontraram aumentos na produção do milho em torno de 17%, em relação à atual, sob concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico de 667 ppm e temperaturas e precipitações iguais as atuais. Por outro lado, Costa et al. (2009), simulando aumentos de temperatura e de concentração de CO<sub>2</sub> de acordo com os valores previstos para o ano de 2050 segundo o IPCC, encontraram uma diminuição de 30% na produção de milho e feijão.

Apesar de já existirem modelos de simulação de crescimento de cultura em cenários climáticos futuros, essas ferramentas não exploram detalhes importantes do sistema fotossintético das plantas em frente à variação da concentração de CO<sub>2</sub> do ambiente. Dessa forma, existe a necessidade de adaptação dos modelos às variações que ocorrem nos processos fotossintéticos diante dos cenários climáticos futuros.

Embora a alta concentração de CO<sub>2</sub> influencie indiretamente vários processos da planta, os efeitos diretos ocorrem nas enzimas bioquímicas, que se manifestam em nível foliar por meio da fotossíntese (Harley et al. 1992). Yin e Schapendonk (2004) e Qiong et al. (2004) mostraram a importância de quantificar essas mudanças na assimilação de CO<sub>2</sub> e seus efeitos no crescimento das culturas utilizando modelos em condições ambientais futuras.

Os modelos mecanicistas apresentados por Farquhar et al. (1980) e adaptados por Yin e van Laar (2005) derivam do conhecimento das relações entre vários tipos de moléculas envolvidas nos processos bioquímicos da fotossíntese. Esses modelos destacam-se por detalharem as reações bioquímicas dos processos, como a carboxilação e o transporte de elétrons, e também por terem como variável de entrada a temperatura média (T<sub>m</sub>), considerada uma grande preocupação nos cenários futuros.

Harley et al. (1992) e Medlyn et al. (1999) estudaram as equações de fotossíntese de Farquhar et al. (1980) aplicadas à cultura do algodão e às florestas europeias, concluindo que as equações descreveram bem o processo de fotossíntese nesses casos. Doi et al. (2010) realizaram estudos para testar respostas fenológicas de algumas culturas em função de temperaturas mais elevadas, encontrando grandes interferências principalmente no ciclo da cultura. Apesar dos relatos registrados, pode-se afirmar que poucos são os trabalhos que exploram os efeitos diretos das alterações climáticas sobre os processos fisiológicos das plantas e posteriormente na produtividade, observando somente resultados pontuais de eventos extremos.

## **OBJETIVOS**

Neste trabalho, objetivou-se em construir um modelo para analisar a influência das mudanças climáticas nos processos fotossintéticos e na produtividade para a cultura do milho.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Dados experimentais**

Os dados experimentais utilizados no desenvolvimento do presente trabalho, foram obtidos a partir de um experimento 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 citado (Figura 2.1),

conduzido por Silva (2010) no período de 28 de outubro de 2008 a 06 de março de 2009, é brevemente descrito a seguir.



Figura 2.1. Fotos do experimento realizado por Silva (2010) com as culturas do milho condições de eventos extremos.

Para o enriquecimento do ar com CO<sub>2</sub> foram desenvolvidas câmaras de topo aberto, as quais eram compostas por módulos retangulares adicionados para acompanhar o desenvolvimento das plantas.

Duas concentrações CO<sub>2</sub> nas câmaras (380ppm e 700ppm) foram monitoradas e ajustadas manualmente na parte da manhã a cada dois dias. O tempo de exposição das plantas à atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub>, era diariamente das 6 às 18h.

Neste experimento, foram coletados dados utilizados para a calibração do modelo. Por meio de uma estação meteorológica automática portátil foram coletados dados de precipitação, radiação solar, temperatura ambiente e temperatura dentro das câmaras de hora em hora. Foi utilizando um medidor portátil de fotossíntese (IRGA - Infra Red Gas Analyser), modelo LCi Photosynthesis System da ADC BioScientific, equipado com sistema de fonte de radiação externa, 1200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , foram realizadas

medições da taxa fotossintética. Também foram coletados dados fenológicos como altura máxima da planta, temperatura foliar, matéria seca da parte aérea e produtividade.

### **Desenvolvimento do modelo**

Para a construção do modelo foi utilizado o aplicativo Model Maker (ModelKinetix 2001). O modelo de fotossíntese foi desenvolvido baseado nas equações de Farquhar et al. (1980), adaptadas por Yin e van Lar (2005).

#### a) Módulo cultura (Fotossíntese, respiração e partição de matéria seca)

##### Fotossíntese

Para o cálculo da fotossíntese bruta foram utilizadas as equações propostas por Farquhar et al. (1980), adaptadas por Yin e van Lar (2005). O modelo simula a fotossíntese em função da energia absorvida, temperatura foliar, capacidade da enzima Rubisco e concentração de CO<sub>2</sub>.

A fotossíntese é dada pela Equação 2.1:

$$P_p = 44 \times 10^{-6} \left( 1 - \frac{\tau}{C_c} \right) \min(V_c, V_j) \quad (2.1)$$

em que:

P<sub>p</sub>: fotossíntese bruta (g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> folha s<sup>-1</sup>);

V<sub>c</sub>: taxa de carboxilação limitada pela enzima Rubisco (μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> folha s<sup>-1</sup>);

V<sub>j</sub> : taxa de carboxilação limitada pelo transporte de elétron (μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> folha s<sup>-1</sup>);

τ: ponto de compensação da radiação fotossinteticamente ativa (μmol mol<sup>-1</sup>);

$C_c$ : concentração de  $\text{CO}_2$  no sítio da Rubisco ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ).

O ponto de compensação da radiação fotossinteticamente ativa ( $\tau$ ) é alcançado quando a assimilação fotossintética de  $\text{CO}_2$  iguala-se à quantidade de  $\text{CO}_2$  liberado pela respiração, calculado de acordo com a equação 2.2:

$$\tau_* = 0.5 \cdot e^{\frac{-3.3801+5220}{298R(T_m+273)}} \cdot \frac{O_i K_{mc}}{K_{mo}} \quad (2.2)$$

em que:

$T_m$ : Temperatura média do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );

$K_{mc}$  e  $K_{mo}$ : Constantes de Michaelis-Mentem para o  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ , respectivamente ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ );

$R$ : Constante universal dos gases ( $\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$ );

$O_i$ : Concentração de oxigênio intercelular ( $\text{mol mol}^{-1}$ ).

Com o aumento da luz acima do ponto de compensação, a fotossíntese aumenta até ser limitada pela capacidade de carboxilação da Rubisco ou pelo metabolismo das trioses fosfato. A taxa de carboxilação limitada pela Rubisco ( $V_c$ ) é calculada pela Equação 2.3:

$$V_c = V_{c\max} C_c / [C_c + K_{mc} (1 + O_i / K_{mo})] \quad (2.3)$$

em que:

$V_{c\max}$ : capacidade máxima da enzima Rubisco para a realização da função carboxilase ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{folha s}^{-1}$ ).

Para o cálculo da capacidade máxima da enzima Rubisco ( $V_{c\max}$ ) e das constantes de Michaelis-Mentem ( $K_{mc}$  e  $K_{mo}$ ) foram utilizadas as equações, 2.4, 2.5 e 2.6 respectivamente ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ).

$$V_{c\max} = V_{c\max 25} e^{\frac{[(Tm - 25)E_{Vc\max}]}{298R(Tm + 273)}} \quad (2.4)$$

$$K_{mc} = K_{mc 25} e^{\frac{[(Tm - 25)E_{Kmc}]}{298R(Tm + 273)}} \quad (2.5)$$

$$K_{mo} = K_{mo 25} e^{\frac{[(Tm - 25)E_{Kmo}]}{298R(Tm + 273)}} \quad (2.6)$$

Em que:

$V_{c\max 25}$ : capacidade máxima da enzima Rubisco para a realização da função carboxilase a temperatura de 25°C ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ folha s}^{-1}$ ).

$K_{mc 25}$  e  $K_{mo 25}$ : Constantes de Michaelis-Mentem para o  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  a 25°C, respectivamente ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ );

$E_{Vc\max}$ ,  $E_{Kmc}$  e  $E_{Kmo}$ : Energias de ativação para  $V_{c\max}$ ,  $K_{mc}$  e  $K_{mo}$ , respectivamente ( $\text{J mol}^{-1}$ ).

A taxa de carboxilação limitada pelo transporte de elétrons ( $V_j$ ) depende da eficiência quântica da planta, sendo calculada de duas formas devido às diferenças entre as culturas  $C_3$  e  $C_4$ , conforme apresentadas nas equações 2.7a e 2.7b respectivamente. No caso da cultura do milho, foi utilizada a equação 2.7b.

$$V_j = j_2 \frac{(2 + f_Q - f_{cyc})C_c}{h \left[ \frac{2(C_c - \tau_*)}{(1 - \phi) + (3C_c + 7\tau_*)} \right] (1 - f_{cyc})} \quad (2.7a)$$

$$V_j = j_2 \frac{(2 + f_Q - f_{cyc})C_c}{h(3C_c - 7\tau_*)(1 - f_{cyc})} \quad (2.7b)$$

Em que:

$j_2$ : taxa de transporte de elétrons ( $\mu\text{mol elétron m}^{-2} \text{folha s}^{-1}$ );

$\phi$ : razão de carboxilação da PEP ( $\text{mol mol}^{-1}$ );

$h$ : número de prótons para produção de 1 mol de ATP ( $\text{mol mol}^{-1}$ );

$f_{cyc}$ : fração de transporte de elétrons do fluxo cíclico do fotossistema I;

$f_Q$ : fração de transporte de elétrons que segue o ciclo-Q.

$f_{cyc}$ ,  $f_{pseudo}$  e  $f_Q$  são as relações de transportes de elétrons no ciclo da fotossíntese e devem satisfazer a Equação 2.8:

$$1 - f_{cyc} - f_{pseudo} = \frac{(4C_c + 8\tau_*)(2 + f_Q - f_{cyc})}{h(3C_c + 7\tau_*)} \quad (2.8)$$

O limite superior de  $J_2$  ( $J_{max}$ ) deve satisfazer as Equações 2.9 e 2.10:

$$\theta J_2^2 - (\alpha_2 I + J_{max}) J_2 + \alpha_2 I J_{max} = 0 \quad (2.9)$$

$$\alpha_2 = \frac{1 - f_{cyc}}{1 + (1 - f_{cyc}) / \phi_{2m}} \quad (2.10)$$

em que:

I: lamela do cloroplasto ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{folha s}^{-1}$ );

$\alpha_2$ : eficiência quântica intrínseca da planta;

$\theta$ : ponto de conversão da curva de resposta;

### Respiração

A respiração de manutenção representa a quantidade de energia necessária para a manutenção dos processos fisiológicos da cultura. Para o cálculo da respiração de manutenção ( $R_m$ ) foi utilizada a equação de McCree (1974) como função tanto do peso seco acumulado da cultura ( $W_{\text{acum}}$ ) quanto da variação de temperatura (equação 1.15).

$$R_m = r_m \times W_{\text{acum}} \times Q_{10}^{\frac{(T_m - t_b)}{10}} \quad (2.11)$$

em que:

$R_m$ : respiração de manutenção ( $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ );

$r_m$ : coeficiente da respiração de manutenção ( $\text{gCO}_2 \text{ gMS}^{-1} \text{ d}^{-1}$ );

$Q_{10}$ : fator de incremento da manutenção.

Os coeficientes de respiração de manutenção foram diferentes para cada órgão da planta, de acordo com Costa et al. (2009).

### Desenvolvimento e partição de matéria seca

Para o estudo do desenvolvimento da cultura, foi utilizada a metodologia do cálculo dos graus-dia, de acordo com a equação proposta por Ometto descrita na Tabela 2.1 pelas equações de 2.12 a 2.16. Nesse método, o cálculo dos graus-dia além de considerar a temperatura basal inferior (Tb), considera também a temperatura basal superior (TB).

Tabela 2.1. Equações para o cálculo dos graus-dia (GD) de acordo com o método proposto por Ometto (1981).

Condição	Equação
TB>TM>Tm>Tb	$GD = \frac{TM - Tm}{2} + Tm - Tb \quad (2.12)$
TB>TM>Tb>Tm	$GD = \frac{(TM - Tb)^2}{2(TM - Tm)} \quad (2.13)$
TB>Tb>TM>Tm	$GD = 0 \quad (2.14)$
TM>TB>Tm>Tb	$GD = \frac{2(TM - Tm)(Tm - Tb) + (TM - Tm)^2 - (TM - TB)}{2(TM - Tm)} \quad (2.15)$
TM>TB>Tb>Tm	$GD = \frac{1}{2} \cdot \frac{(TM + Tb)^2 - (TM - TB)^2}{Tm - Tm} \quad (2.16)$

Em que:

TM = temperatura máxima do dia, °C

Tm = temperatura mínima do dia, °C

Tb = temperatura basal inferior, °C

TB = temperatura basal superior, °C

As áreas foliares das culturas foram acumuladas ao longo de seu crescimento. O índice de área foliar (IAF) foi calculado considerando a área foliar específica (AFE) e a partição de matéria seca para as folhas (PF), que varia ao longo do estágio de desenvolvimento da planta (2.21).

$$IAF = AFE \times PF \quad (2.21)$$

em que:

AFE: área foliar específica ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ ); e

PF: partição da matéria seca para as folhas ( $\text{g m}^{-2}$ ).

A partição da matéria seca foi feita de acordo com os coeficientes utilizados por Costa et al. (2009).

#### b) Módulo Climático

Para a alimentação do modelo foram utilizados dados meteorológicos diários. As variáveis utilizadas foram temperatura do ar e concentração de  $\text{CO}_2$ .

As primeiras simulações foram feitas com os dados de temperatura observados para a cidade de Viçosa durante os meses de outubro de 2008 a março de 2009, período do experimento (Figura 2.2).

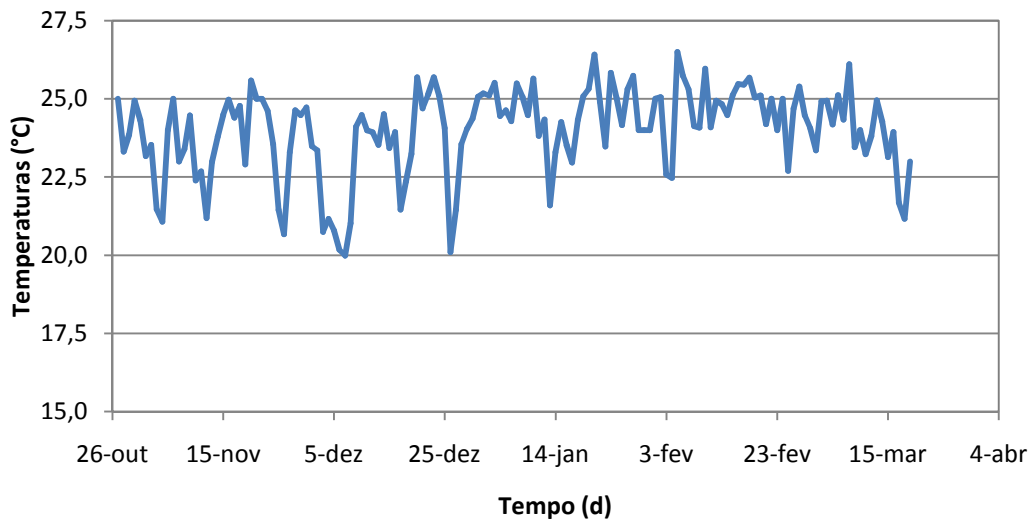


Figura 2.2. Temperaturas médias de Viçosa nos meses de outubro de 2008 a março de 2009.

Após os testes, foram feitas as simulações do desenvolvimento da cultura em condição de temperatura elevada, considerando-se um aumento de temperatura aleatório. As simulações supracitadas foram feitas após o desenvolvimento de uma sub-rotina específica para tal fim. A sub-rotina desenvolvida partiu dos dados de temperatura máxima e mínima observados durante o experimento, sendo que em cada valor diário observado foram somados números aleatórios entre 0 e 2°C (primeira série), 0 e 4°C (segunda série), 0 e 6°C (terceira série) e 0 e 10°C (quarta série). A geração aleatória foi feita no programa Excel, de maneira que os aumentos nas medias das temperaturas para as séries foram de 1, 2, 3 e 5 °C, respectivamente.

Foram também feitas simulações com variação nas concentrações de CO<sub>2</sub>. O modelo foi testado mantendo-se as temperaturas medidas (observadas) de Viçosa durante o experimento, testando-se as concentrações de CO<sub>2</sub> ambiente de 380 e 700 ppm. Por fim, foram feitas simulações com variações na temperatura do ar e na concentração de CO<sub>2</sub> ambiente simultaneamente.

## Calibração do modelo

Para a calibração do modelo foram usados dados obtidos no experimento citado anteriormente (Silva, 2010).

A área foliar específica (AFE) foi estimada durante o experimento, sendo equivalente ao quociente da área foliar total pela massa das folhas. Foram realizados alguns testes para verificar se existiram variações ao longo do ciclo da cultura, mas isso não foi observado. O valor usado AFE para calcular no modelo índice de área foliar foi de  $0,027 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ .

O teor de nitrogênio na folha foi medido durante o experimento citado e houve uma variação entre  $1,166$  e  $1,519 \text{ g m}^{-2} \text{ folha}^{-1}$ . Por ser um parâmetro extremamente sensível, o modelo foi então alimentado com dados diários de nitrogênio na folha. Nos dias em que não ocorreram medições, o último valor medido foi usado no preenchimento da série.

A partir da regressão dos dados coletados pelo IRGA, uma relação entre a concentração de  $\text{CO}_2$  no ambiente ( $C_a$ ) e a concentração de  $\text{CO}_2$  interna ( $C_i$ ), no mesófilo ( $C_i$ ) foi obtida. Assim, foi possível obter o coeficiente para o cálculo da concentração de  $\text{CO}_2$  no sítio de carboxilação da rubisco ( $C_c$ ). O valor da  $C_c$  encontrado e usado no modelo foi equivalente a 79% de  $C_a$ .

Durante o experimento, foram feitas duas medições das taxas fotossintéticas, os valores simulados pelo modelo de fotossíntese estiveram próximos a esses valores, variando de  $20$  a  $40 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

O experimento foi desenvolvido buscando condições ideais de crescimento para as plantas, assim o modelo foi feito para o estudo da produtividade potencial, desconsiderando qualquer penalidade por falta de água.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Resposta da cultura do milho ao incremento na concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico**

Na Tabela 2.2, é possível visualizar os valores das taxas fotossintéticas simulados pelo modelo estudado, considerando-se as temperaturas observadas durante o experimento e variando-se as concentrações de CO<sub>2</sub> ambiente de 380 para 700 ppm.

Observam-se, na Tabela 2.2, valores diários da taxa de fotossíntese próximos nas duas diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> atmosférico, de 350 e 700 ppm. Esses resultados estão de acordo com Taiz e Zeiger (2010). Os autores citados relataram que devido ao mecanismo de concentração de CO<sub>2</sub> existente nas plantas do tipo C<sub>4</sub> os valores atuais de concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, já são suficientes para a saturação da fotossíntese, não apresentando acréscimos na carboxilação com o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> ambiente.

As plantas C<sub>4</sub> possuem um mecanismo diferenciado, pois apresentam a enzima PEP-Carboxilase (PEPCase), responsável pela fixação primária de CO<sub>2</sub> nas folhas. Assim, a enzima Rubisco tem sempre à disposição CO<sub>2</sub> para a realização da carboxilação. Portanto, o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente não interfere em grandes proporções na concentração de CO<sub>2</sub> interna disponível para a Rubisco. Em razão do exposto, não foi observado um aumento expressivo da taxa fotossintética nas simulações realizadas.

Tabela 2.2. Valores da taxa fotossíntese diária ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) simulados pelo modelo com a variação de  $\text{CO}_2$  de 380 e 700 ppm.

t (d)	CO <sub>2</sub> 380ppm	CO <sub>2</sub> 700ppm	t (d)	CO <sub>2</sub> 380ppm	CO <sub>2</sub> 700ppm	t (d)	CO <sub>2</sub> 380ppm	CO <sub>2</sub> 700ppm
10	30.8271	30.8283	47	21.5135	21.5142	84	41.7278	41.7296
11	23.0453	23.0461	48	20.0841	20.0847	85	42.1598	42.1616
12	26.137	26.1379	49	19.5619	19.5625	86	39.8945	39.8961
13	26.137	26.1379	50	18.2105	18.211	87	41.7278	41.7296
14	25.1637	25.1646	51	18.376	18.3765	88	30.4652	30.4662
15	25.1637	25.1646	52	20.7925	20.7931	89	36.2171	36.2184
16	25.1637	25.1646	53	29.3169	29.3181	90	39.3326	39.3341
17	20.098	20.0985	54	27.0378	27.0388	91	39.0782	39.0797
18	20.8152	20.8158	55	27.0378	27.0388	92	33.5799	33.581
19	34.2537	34.2553	56	27.4126	27.4136	93	39.8373	39.8388
20	35.4132	35.415	57	26.2827	26.2837	94	41.7846	41.7863
21	33.1713	33.1728	58	28.8806	28.8818	95	40.8269	40.8285
22	26.9147	26.9157	59	26.0932	26.0941	96	41.805	41.8069
23	29.5751	29.5763	60	28.8806	28.8818	97	37.5154	37.5168
24	24.5816	24.5824	61	24.3711	24.3718	98	34.0042	34.0055
25	30.8271	30.8283	62	26.9448	26.9456	99	37.9594	37.9609
26	26.7193	26.7203	63	30.7065	30.7076	100	36.1424	36.1438
27	31.3072	31.3086	64	33.5317	33.533	101	38.1785	38.18
28	30.169	30.1702	65	35.7538	35.7553	102	40.0401	40.0418
29	31.3072	31.3086	66	37.0269	37.0285	103	36.7643	36.766
30	29.6528	29.654	67	36.1309	36.1324	104	36.7643	36.766
31	31.7611	31.7625	68	39.288	39.2897	105	36.642	36.6437
32	31.7611	31.7625	69	36.3395	36.3408	106	36.9962	36.9979
33	26.5275	26.5284	70	23.794	23.7946	107	37.3113	37.3131
34	34.3142	34.3157	71	31.4714	31.4725	108	35.0522	35.0537
35	34.4328	34.4344	72	32.9433	32.9444	109	30.3189	30.32
36	35.7972	35.799	73	34.6557	34.657	110	26.549	26.5499
37	33.9363	33.9378	74	36.576	36.5774	111	35.9721	35.9737
38	27.7101	27.7111	75	38.7792	38.7807	112	32.1406	32.1419
39	27.1198	27.1208	76	37.8149	37.8164	113	33.295	33.2963
40	23.9076	23.9084	77	38.3001	38.3016	114	31.3415	31.3427
41	26.5733	26.5742	78	39.7161	39.7177	115	30.1119	30.113
42	31.5239	31.5252	79	37.3246	37.326	116	35.6786	35.6801
43	33.2494	33.2508	80	38.3001	38.3016	117	31.7435	31.7448
44	31.5239	31.5252	81	40.1722	40.1739	118	33.1069	33.1083
45	30.7212	30.7223	82	39.8945	39.8961	119	31.1388	31.14
46	30.1091	30.1103	83	42.3713	42.3731	120	32.06	32.0614

Para a previsão da matéria seca total, foi testado o modelo completo, no qual foram considerados o resultado total da fotossíntese e o gasto energético com a respiração da planta. Esses testes foram feitos nas mesmas condições anteriores, variando a concentração de CO<sub>2</sub>. Os resultados gerados pelo modelo podem ser comparados com os resultados experimentais na Tabela 2.3:

Observa-se que os resultados gerados pelo modelo foram próximos aos valores encontrados no experimento, mostrando resposta satisfatória em relação à simulação do milho em condições de CO<sub>2</sub> elevado.

Tabela 2.3. Matéria seca total e matéria seca dos grãos durante o experimento realizado em Viçosa e a simulação, com variações na concentração de CO<sub>2</sub> de 350 ppm a 700 ppm.

	Matéria seca total (g m <sup>-2</sup> )	Matéria seca de grãos (g m <sup>-2</sup> )
Experimento 380 ppm	2.712	1.132
Simulação 380 ppm	2.608	1.208
Experimento 700 ppm	2.666	1.137
Simulação 700 ppm	2.737	1.268

Na Figura 2.3 representa-se a variação da matéria seca total da planta em função das diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> ambiente estudadas ao longo dos estádios de desenvolvimento da cultura.

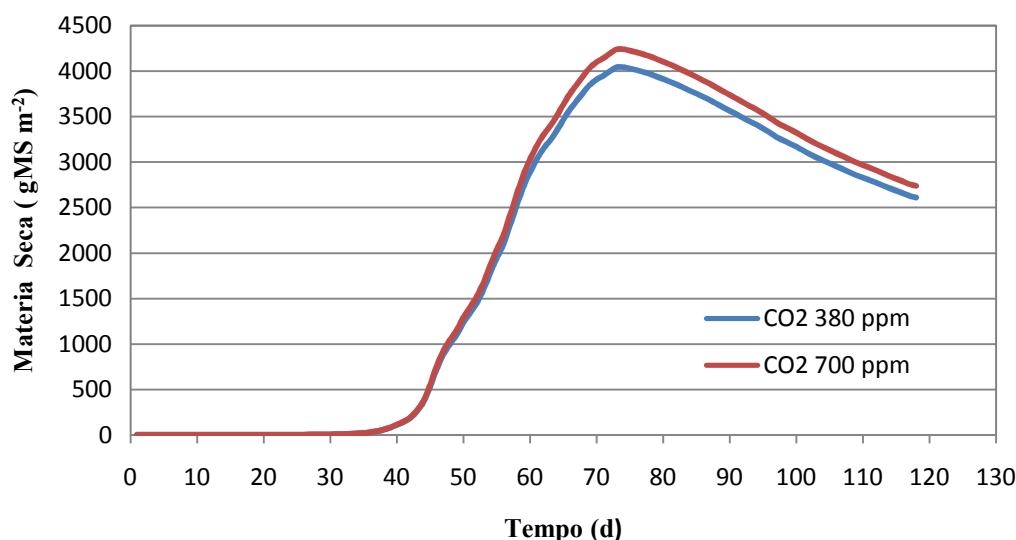


Figura 2.3. Matéria seca total simulada pelo modelo para a cultura do milho ao longo dos dias, sob diferentes condições de CO<sub>2</sub> ambiente, 380 ppm e 700 ppm.

Observa-se um pequeno aumento na matéria seca total do milho com o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> de 350 para 700 ppm (Figura 2.3). Isso começa a aparecer próximo ao estágio de pendoamento (aproximadamente em 70 dias após o plantio), correspondendo a um incremento de aproximadamente 5% na matéria seca final. Em alguns estudos experimentais, observaram-se resultados semelhantes. Como exemplos, citam-se Poorter e Navas (2003), que relataram que plantas com mecanismo fotossintético C<sub>3</sub> cultivadas em ambientes com altas concentrações de CO<sub>2</sub> apresentaram em média 48% de acréscimo na biomassa, enquanto as C<sub>4</sub> os valores ficaram em torno de 12%. De acordo com os autores, o aumento na biomassa das culturas C<sub>4</sub> com o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> ambiente é um fenômeno intrigante, uma vez que as taxas fotossintéticas destas já se encontram saturadas na concentração atual de CO<sub>2</sub>.

O resultado obtido (Figura 2.3) pode ter algumas explicações. Em primeiro lugar, mesmo o milho sendo uma planta C<sub>4</sub>, algumas espécies podem não estar completamente saturadas nas concentrações de CO<sub>2</sub> atuais. Em segundo lugar, o

aumento da concentração de CO<sub>2</sub> pode induzir uma diminuição da condutância estomática, reduzindo conseqüentemente a transpiração e aumentando a eficiência no uso da água. Em terceiro lugar, a diminuição da transpiração pode aumentar a temperatura da folha, o que pode aumentar a fotossíntese nas plantas C<sub>4</sub> (Poorter e Navas, 2003).

Resultados também semelhantes foram encontrado por Leakey et al. (2004), que em experimento com a cultura do milho não obtiveram resposta ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub> (experimentos realizados com concentração de CO<sub>2</sub> variando de 354 a 549 ppm). Streck e Alberto (2006), com simulação de cenários futuros para a cultura do milho, relataram acréscimo da produtividade de grãos com o aumento de CO<sub>2</sub> (700 ppm).

#### **A resposta da cultura do milho ao incremento de temperatura do ar**

Depois de testado o modelo com incremento do CO<sub>2</sub>, foi realizada outra simulação, mantendo-se a concentração de CO<sub>2</sub> em 380 ppm e variando-se a temperatura de acordo com as simulações previamente citadas.

As variações dos valores obtidos das taxas fotossintéticas a partir da simulação pelo modelo podem ser observadas na Figura 2.4.

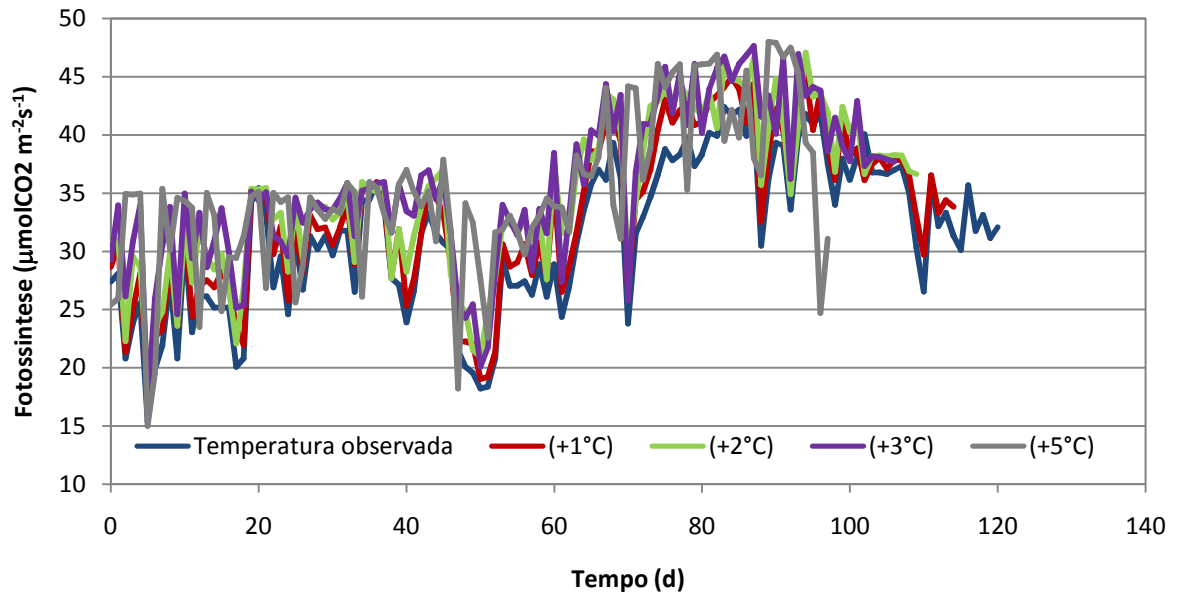


Figura 2.4. Taxas fotossintéticas simuladas levando-se em conta as temperaturas observadas e simuladas em Viçosa, no período de estudo.

Quando a simulação foi feita aumentando a temperatura média em 1°C, observou-se que o valor da taxa fotossintética aumentou consideravelmente (Figura 2.4). Já quando a temperatura média simulada é majorada em 5°C, a fotossíntese atinge seu limite, não havendo mais ganhos consideráveis.

O principal motivo das plantas C<sub>4</sub> serem favorecidas com o aumento de temperatura relaciona-se ao fato dessas plantas suprimirem a fotorrespiração. Com o aumento da temperatura, observa-se aumento na taxa fotossintética. Segundo Taiz e Zieger (2010), a planta C<sub>4</sub> requer uma temperatura maior. Em geral, as maiores taxas fotossintéticas são obtidas entre 30 e 40°C. Observa-se que o aumento da temperatura diária favorece diretamente a fotossíntese para a cultura do milho (Figura 2.4). Entretanto, esse aumento tem um limite, que pode ser observado quando a temperatura atinge valores elevados, próximos a 50°C.

Para a fotossíntese bruta da cultura do milho, o aumento da temperatura é favorável. Porém implica em outros fatores para a cultura, como, por exemplo, aumento nas taxas de respiração e diminuição do ciclo. Essa diminuição do ciclo pode ser observada na Figura 2.4, onde as taxas fotossintéticas simuladas com a temperatura observada vão até 120 dias; já com a temperatura acrescida de 5°C o ciclo foi reduzido para 97 dias.

Na Figura 2.5, observa-se aumento das taxas respiratórias à medida que a temperatura foi elevada. O modelo calcula as taxas respiratórias de cada órgão da planta separadamente. No final tudo foi somado, resultando no gasto energético que a planta tem com a respiração. À medida que a temperatura subiu, aumentaram-se também as taxas respiratórias; tal fato pode ser mais facilmente observado com o acréscimo de 3 e 5°C na temperatura média.

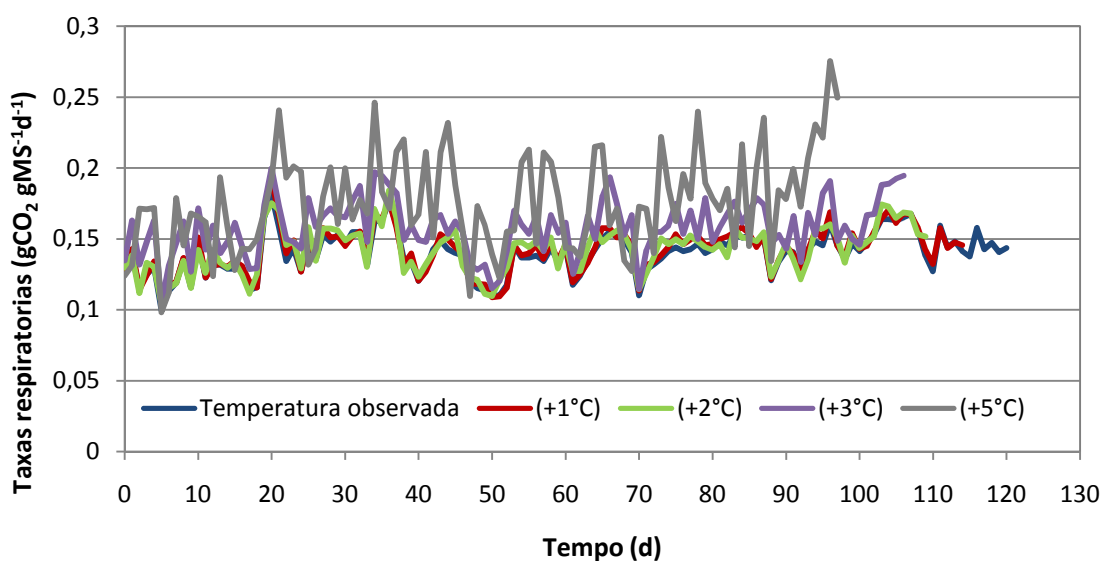


Figura 2.5. Taxas respiratórias simuladas pelo modelo com a temperatura observada de Viçosa e com as temperaturas simuladas.

Em relação à matéria seca, foram feitas avaliações complementares. Os testes foram feitos nas mesmas condições anteriores de variação temperatura, sendo que os resultados gerados pelo modelo podem ser observados na Figura 2.6.

O modelo simulou o desenvolvimento da cultura em relação à matéria seca total ao longo do tempo. Na primeira etapa do processo, ocorreu um maior ganho maior de matéria seca, com uma inclinação na linha de incremento de matéria seca total mais acentuada. Já na etapa final, ocorreu uma diminuição da matéria seca total, uma vez que o modelo a considera como de senescência da planta.

As diferentes curvas do incremento de matéria seca total, representada na Figura 2.6, foram geradas quando o modelo simulou a matéria seca total nas diferentes condições de temperatura estudadas.

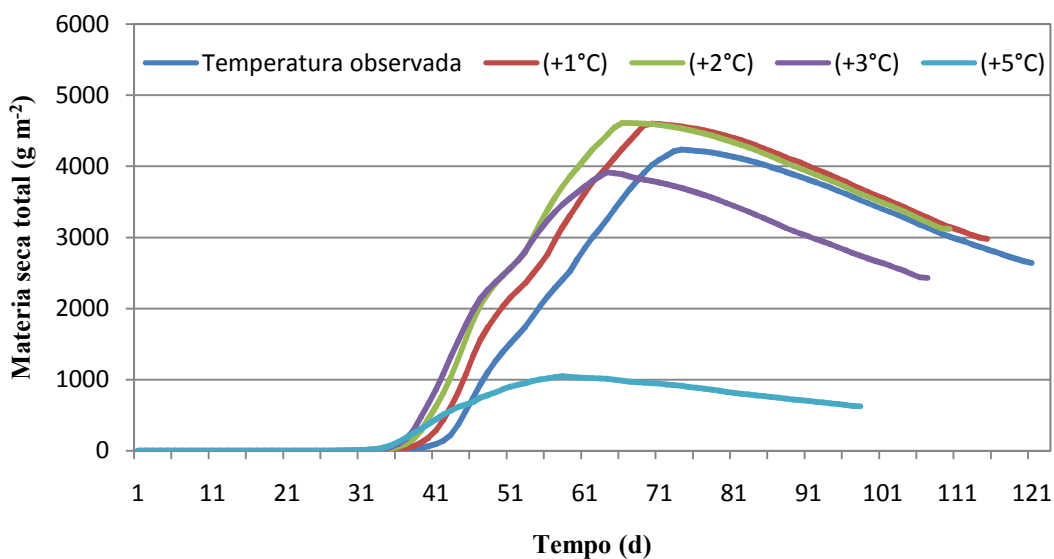


Figura 2.6. Perfil do desenvolvimento da matéria seca simulados pelo modelo com a temperatura observada em Viçosa durante o experimento e com as temperaturas simuladas.

Na Figura 2.7, observa-se o desenvolvimento dos grãos. No início do ciclo, a energia disponível da fotossíntese é utilizada para o crescimento vegetativo da planta; depois de certo tempo, tem início o desenvolvimento dos grãos que, por fim, completam o ciclo com sua maturação.

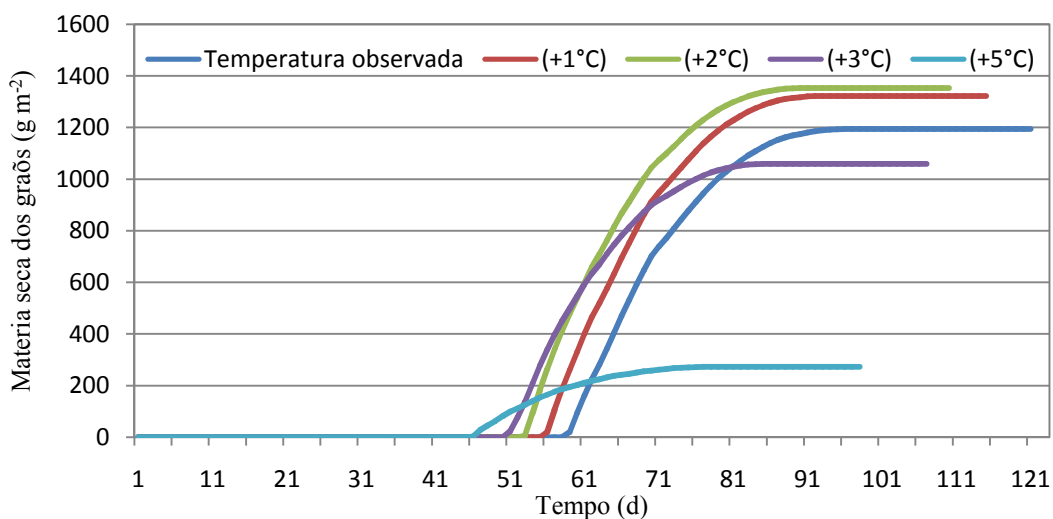


Figura 2.7. Perfil do desenvolvimento dos grãos de milho simulados pelo modelo com a temperatura observada em Viçosa durante o experimento e com as temperaturas simuladas.

Quando a temperatura foi simulada com um aumento médio de 1 e 2°C, a planta respondeu de forma positiva, com um acréscimo no ganho de matéria seca total e de matéria seca dos grãos (Figuras 2.6 e 2.7). Entretanto, quando a temperatura foi simulada com um aumento médio de 3°C, houve o início da resposta negativa. O acréscimo na taxa fotossintética passa a não ser compensado pelo aumento na taxa respiratória e pelo encurtamento no ciclo da cultura com rápido acúmulo dos graus-dia, sendo esse fato negativo para a cultura.

Na simulação feita com acréscimo de 5°C, observou-se uma queda na produtividade ainda maior, na ordem de 75%. Nessas condições, o incremento na taxa

fotossintética não foi suficiente para compensar os outros fatores envolvidos no processo para a produção de matéria seca nas condições testadas.

Os valores da produtividade final, matéria seca dos grãos, podem ser visualizados na Figura 2.8. Com o aumento de 1°C na temperatura média, observou-se um incremento de aproximadamente 11% na produtividade do milho, quando o elevação de 2°C na temperatura, a planta continuou a responder de forma positiva com um aumento de 13% na produtividade final, comparando com os valores simulados a partir os dados observados do experimento.

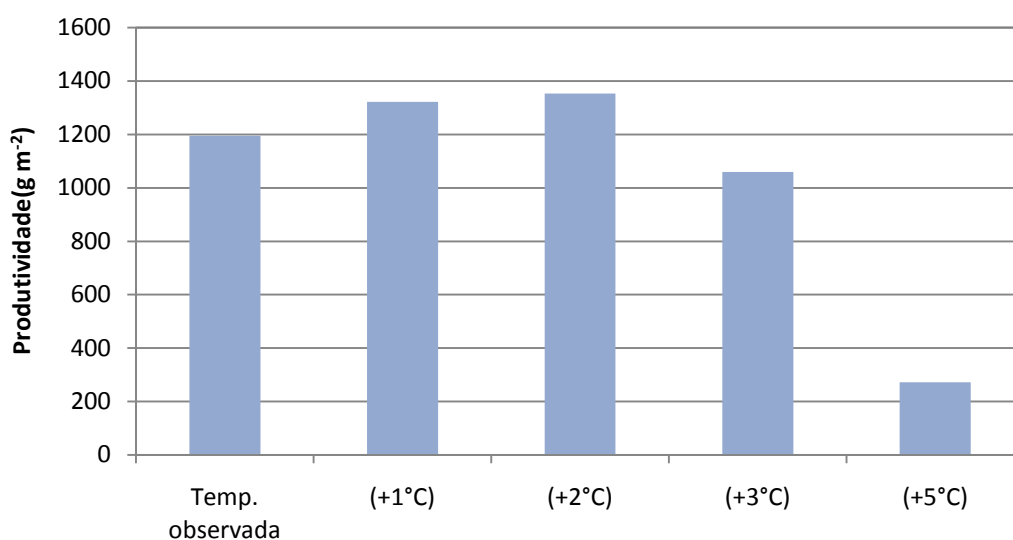


Figura 2.8. Produtividade final gerada pelo modelo de simulação com a temperatura observada em Viçosa durante o experimento e com as temperaturas aumentadas.

Uma das justificativas da aumento de produtividade com um pequeno aumento na temperatura (1 e 2°C) pode estar relacionado com o fato da cidade de Viçosa- MG ter uma temperatura média baixa. A normal climatológica da temperatura media anual para a cidade de Viçosa é 19,4°C, quando comparamos por exemplo com a cidade de Sete Lagoas 20,9°C, onde a cultivar foi desenvolvida.

Com o aumento da temperatura utilizado para a cidade de Viçosa, observou-se uma redução, ainda que pequena, no ciclo da cultura,, não ocasionando, porém, diminuição de produtividade nos primeiros casos.

Os resultados com incremento de produtividade encontrados aqui nas primeiras simulações com acréscimos de 1 e 2°C, estão de acordo Pinto et al. (2004), em um estudo feito sobre o aquecimento global e a agricultura, que previa um aumento na produtividade potencial das plantas C<sub>4</sub> como o milho e sorgo, caso o aumento na concentração de CO<sub>2</sub> viesse associado à elevação da temperatura ambiente. Resultados de trabalhos conduzidos por Mundstock et al. (2005), apresentam, também, alto rendimento de grãos de milho em regiões do Sul do Brasil, uma vez que a ocorrência de temperaturas baixas é frequente nessas regiões, o que limita o rendimento desses grãos.

Quando a simulação foi feita com acréscimo de 3°C, observou-se uma queda de 11%. Observa-se que com o aumento de 5°C essa queda é agravada em 75% da produção. Esse resultados estão de acordo com Siqueira et al. (2001), que também, com resultados de simulações em condições de aumento de temperatura, projetaram para a cultura do milho no país reduções na produtividade entre 14 a 33%, com encurtamento de ciclos entre 33 a 21% devido, principalmente, ao aumento de temperatura e também à redução da precipitação. Streck et al., (2006) também observaram uma redução no rendimento dos grãos de milho quando se consideraram incrementos na temperatura. Esse fato ocorreu principalmente devido ao grande encurtamento do ciclo da cultura.

Em um estudo experimental desenvolvido por Campos et al. (2010), com o plantio do milho safrinha em 5 regiões diferentes de Goiás, observou-se uma grande

diferença na produtividade obtida. Esse resultado foi associado às diferentes condições climáticas de cada região do estado.

### **A resposta da cultura do milho ao incremento simultâneo da concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura**

Observou-se que um pequeno aumento na temperatura é favorável para a cultura do milho, uma vez que plantas C<sub>4</sub> são favorecidas com essa elevação (Figura 2.8). Tal ganho tem um limite aparente: acima de 2°C esse aumento não é mais favorável. Já com o incremento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico para a cultura C<sub>4</sub> em questão, não se notaram grandes vantagens, embora limitações também não tenham sido observadas.

Assim, os resultados com o incremento simultâneo da concentração CO<sub>2</sub> e temperatura ficaram próximos dos resultados encontrados quando apenas o aumento da temperatura foi simulado (Tabela 2.4).

Tabela 2.4. Matéria seca total e matéria seca dos grãos do milho simulados pelo modelo em diferentes condições.

Simulação	Matéria seca grãos (g m <sup>-2</sup> )
CO <sub>2</sub> (380) ppm	1194
CO <sub>2</sub> (700) ppm	1253
CO <sub>2</sub> (700 ppm) + Temperatura (1°C)	1388
CO <sub>2</sub> (700 ppm) + Temperatura (2°C)	1418
CO <sub>2</sub> (700 ppm) + Temperatura (3°C)	1059
CO <sub>2</sub> (700 ppm) + Temperatura (5°C)	492

Os resultados encontrados podem ser atribuídos ao fato de que a planta C<sub>4</sub> tem um mecanismo diferenciado, no qual possui a enzima PEP que armazena uma reserva de CO<sub>2</sub> na folha da planta. Esse CO<sub>2</sub> é utilizado pela enzima Rubisco na realização da função carboxilaze. Assim o aumento desse substrato no ambiente não implica em um aumento na concentração de CO<sub>2</sub> interno da folha, conseqüentemente não se observa um aumento nas taxas fotossintéticas. Já o aumento na temperatura representa, sim, um ganho nas taxas fotossintéticas.

Dessa maneira, com o acréscimo simultâneo da concentração de CO<sub>2</sub> ambiente e da temperatura, observa-se que o favorecimento no desenvolvimento do milho é semelhante nos casos do aumento simultâneo de CO<sub>2</sub> e temperatura ou de aumento somente dessa última variável. Ressalta-se que o CO<sub>2</sub> elevado, apesar de não favorecer, também não atrapalha o desenvolvimento da planta do milho.

Os resultados aqui obtidos são similares aos reportados por Streck e Alberto (2006) que simularam aumentos simultâneos na concentração de CO<sub>2</sub> e na temperatura ambiente, estudando a cultura do milho. Com um acréscimo de temperatura de 3°C acima do limite da planta, o efeito da temperatura anulou o pequeno efeito positivo do aumento de CO<sub>2</sub> na produtividade. Já com aumentos elevações de 4°C, houve redução na produtividade simulada.

## CONCLUSÕES

O modelo estudado mostra-se como uma ferramenta importante para o entendimento dos processos de desenvolvimento da cultura do milho. As taxas fotossintéticas simuladas estavam de acordo com as esperadas, uma vez que o milho já possui algumas características conhecidas.

O milho em condições de aumento de CO<sub>2</sub> não apresentou ganhos nas taxas fotossintéticas e nem na produtividade, porém também não é desfavorecido nessas condições.

Já no estudo com o aumento da temperatura, as taxas fotossintéticas subiram quando a temperatura aumentou. Mas a planta é favorecida apenas com o aumento de até 2°C. Quando a cultura do milho é simulada com acréscimos de 3°C e 5°C a resposta passa a ser diferente, a produtividade diminui devido principalmente ao aumento das taxas fotossintéticas e a redução do ciclo da cultura.

## REFERÊNCIAS

AGOSTINETTO, D.; FLECK, N. G.; RIZZARDI, M. A.; BALBINOT JR. Potencial de emissão de metano em lavouras de arroz irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, nº 6, p. 1073 – 1081, 2002.

ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JÚNIOR, J.; ÁVILA, A.M.H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.1057-1064, 2004.

COSTA, L. C., JUSTINO, F. B., OLIVEIRA, L. J. C., SEDIYAMA, 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.

DOI, H.; TAKAHASHI, M.; ATANO, U. Genetic diversity increases regional variation in phenological dates in response to climate change. **Global Change Biology** v. 16, p. 373–379, 2010.

EASTERLING, W. E.; MEANS, L. O.; HAYS, C. J.; MARX, D. Comparison of agricultural impacts of climate change calculated from high and low resolution climate change scenarios. Part II. Accounting for adaptation and CO<sub>2</sub> direct effects. **Climate Change**, v.51, p.173-197, 2001

FAO. Food and Agriculture Organization. Rice and narrowing the yield gap. London, 2004.

FARQUHAR, 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** 149, p. 78-90, 1980.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 360p. 2008.

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.

HARLEY, C.; THOMAS, R. B.; REYNOLDS, J.F.; STRAIN, B.R. Modelling photosynthesis of cotton grown in elevated CO<sub>2</sub>. **Plant, Cell and Environment** v.15, p. 271-282, 1992

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.

MEDLYN, B. E.; BADECK, F. W.; DE PURY, D. G. G.; BARTON, C. V. M.; BROADMEADOW, M.; CEULEMANS, R.; DE ANGELIS, P.; FORSTREUTER, M.; JACH, M. E.; KELLOMÄKI, S.; LAITAT, E.; MAREK, M.; PHILIPPOT, S.; REY, A.; STRASSEMAYER, J.; LAITINEN, K.; LIOZON, R.; PORTIER, B.; ROBERTTZ, P.; WANG, K.; JSTBID, P. G. Effects of elevated [CO<sub>2</sub>] on photosynthesis in European forest species: a meta-analysis of model parameters. : **Plant, Cell & Environment**, v. 22, p. 1475-1495, 1999.

McCREE, K. J. Equations for the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum, as function of dry weight, photosynthesis rate and temperature. **Crop Science**, Madison, v.14, p.509-514, 1974.

MUNDSTOCK, C. M. **Manejo da cultura do milho para alto rendimento de grãos**. (Tese de doutorado) Universidade do Rio Grande do Sul, faculdade de agronomia. 2005.

OMETTO, J. C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo: Agronômica Ceres 1981. 440p.

PARRY, M. L.; ROSENZWEIG, C.; IGLESIAS, A.; LIVERMORE, M.; FISCHER, G. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. **Global Environmental Change**, v.14, p.53-67, 2004.]

PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; Junior, J. Z. O aquecimento global e a agricultura. Artigo técnico. Saneas / agosto 2004.

PHILLIPS, D.L., J.J. LEE, AND R.F. DODSON. Sensitivity of the U.S. Corn Belt to climate change and elevated CO<sub>2</sub>: I. Corn and soybean yields. **Agricultural Systems**, V. 52:p. 481-502, 1996.

POORTER H. E NAVAS M. L. Plant growth and competition at elevated CO<sub>2</sub>: winners, losers and functional groups. **New Phytologist**, 157,175–198, 2003.

QIONG, G., ZHANG, X., HUANG, Y., XU, H., A comparative analysis of four models of photosynthesis for 11 plant species in the loess Plateau, **Agricultural and forest meteorology**, v.126, p. 2003-222, 2004.

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, n° 1, p. 53 - 60, 1996

SIQUEIRA, O.J.W.; STEINMETZ, S.; SALLES, L.A.B. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas: **Embrapa Meio Ambiente**,. p.33-63, 2001

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, vol. 35, n° 3, p. 730 – 740, 2005.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. **Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho**. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, vol. 41, n° 9, p. 1351 – 1359, set. 2006.

SILVA, J. B. L. **Respostas das culturas de feijão submetido ao estresse hídrico e de milho em atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub>**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 5.ed. Sunderland Sinauer Associates, 782 p, 2010.

YIN, X., SCHAPENDONK, A.H.C.M, Simulating the partitioning of biomass and nitrogen between root and shoot in crop and grass plants. NJAS-Wageninge **Journal of Life Sciences** v. 51, p.. 407-426, 2004.

YIN, X., van LAAR. H. H, **Crop Systems Dynamics an ecophysiological simulation model for genotype-by-environment interactions**, Wageningen Academic Publishers, The Netherlands, 2005.

### CAPÍTULO 3

## MODELO DE SIMULAÇÃO FOTOSSINTÉTICA PARA ANÁLISE A RESPOSTA DA CULTURA DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.) EM CONDIÇÕES DE TEMPERATURA E CO<sub>2</sub> ELEVADOS

### RESUMO

Atualmente, estudos da interação do clima com as culturas agrícolas tem sido de grande importância, uma vez que existe uma grande preocupação de como essas culturas irão responder em um cenário futuro, com aumento de temperatura e maior concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Diante desta preocupação o presente trabalho estudou as respostas das taxas fotossintéticas e a produtividade final do feijoeiro em condições de aumento da temperatura do ar e da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico. Para tal estudo foi utilizado o modelo de fotossíntese proposto por Farquhar e adaptado por Yin e van Lar. Esse modelo foi implementado e calibrado utilizando os dados de experimentos conduzidos em Viçosa, no ano de 2009. Foi verificado, nos resultados das simulações, um aumento nas taxas fotossintéticas e também na produtividade do feijão, quando esse foi testando com as concentrações de CO<sub>2</sub> atmosférico de 700 ppm em relação a concentração de 380 ppm. Os ganhos na matéria seca total (produtividade) chegaram a 35% quando simulado com a concentração de CO<sub>2</sub> em 700ppm. Foram feitas também simulações com acréscimos na temperatura (1, 2, 3 e 5°C), porém as respostas não foram positivas, pois os aumentos na temperatura não resultaram em elevações nas taxas fotossintéticas e reduziram o ciclo da cultura, diminuindo a produtividade final.

**PALAVRAS-CHAVE:** Feijão, taxas fotossintéticas, variação climática.

## INTRODUÇÃO

A cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) tem grande importância social e econômica para o Brasil, em particular para o estado de Minas Gerais, segundo maior produtor do país (MAPA, 2012). O feijão é considerado um dos mais importantes alimentos na dieta dos brasileiros, por ser uma excelente fonte proteica, além de ter carboidratos, vitaminas, minerais e compostos fenólicos com ação antioxidante. Devido a essa grande importância existe a necessidade de maiores estudos com relação a essa cultura.

O feijoeiro é classificado como uma cultura do tipo C<sub>3</sub>, de ciclo curto. Apesar da sua ampla distribuição geográfica, o feijoeiro é pouco tolerante a fatores extremos do ambiente, considerado uma cultura muito sensível às variações das condições ambientais. As elevadas temperaturas são problemas para o cultivo do feijoeiro em muitas regiões do Brasil (Téran e Singh, 2002).

Segundo o IPCC um aumento na temperatura média mundial vem sendo observado e, segundo as previsões, esses aumentos continuarão sendo ainda maiores nos próximos anos.

Fisiologicamente, temperaturas elevadas causam um estresse térmico nas culturas, especificamente em culturas C<sub>3</sub>, pois existe um aumento da atividade de oxigenase da rubisco, isto é, aumento da fotorrespiração. Existe também a diminuição da pressão parcial de CO<sub>2</sub>, devido ao fechamento parcial dos estômatos por causa das altas taxas transpiratórias. Se a temperatura continuar aumentando poderá ocorrer inibição das taxas fotossintéticas, e até a redução da estabilidade da membrana em conjunto com distúrbios funcionais (Pritchard e Amthor, 2005).

A alta temperatura do ar é considerada o fator de maior influência em algumas etapas do desenvolvimento do feijoeiro, entre elas, a pré-floração, a formação de vagens

e o enchimento de grãos, sendo também responsável por baixas massas de sementes e reduzidos números de sementes por vagem (Gonçalves et al., 1997; Didonet et al., 2001;). As baixas temperaturas influenciam principalmente na fase de germinação, podendo impedir, reduzir ou atrasar a germinação das sementes e emergência das plântulas, resultando em reduzida população de plantas (Vieira et al., 2006).

As regiões ideais para o cultivo do feijoeiro, segundo alguns autores (Téran e Singh, 2002; Fancelli e Dourado Neto, 2008) devem possuir temperaturas médias durante o ciclo entre 20 e 22°C, sendo a ótima 21°C. As temperaturas médias durante o mês mais quente do ciclo não devem ser superiores a 24°C, principalmente, durante a fase de florescimento e formação de grãos. Segundo Gonçalves et al. (1997), a ocorrência de temperaturas superiores a 32°C, durante o decorrer do dia, resulta em prejuízos no crescimento e desenvolvimento da cultura.

Shonnard e Gepts (1994), em experimentos com o feijão comum sob condições de altas temperaturas, em dois estádios de desenvolvimento (pré-floração e enchimento de vagens), observaram quedas na produção. Segundo Streck e Alberto (2006), altas temperaturas causam encurtamento do ciclo da cultura e conseqüentemente uma diminuição na produção de grãos.

Outro fator importante mostrado em cenários futuros do clima é o aumento expressivo da concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente. Alguns trabalhos já têm sido desenvolvidos nessa área. Streck (2005) em seus estudos, concluiu que o aumento de CO<sub>2</sub> em duas vezes a concentração atual, sem elevação de temperatura, pode causar um aumento de produção em torno de 30% para culturas tipo C<sub>3</sub>. No entanto, o mesmo autor afirma que com o acréscimo de 1°C, os efeitos benéficos do aumento de CO<sub>2</sub> podem ser anulados. Lambreva et al. (2005), estudando interações do feijão com

temperatura, luz e CO<sub>2</sub>, observaram que, em altas temperaturas (39°C), os efeitos das altas concentrações de CO<sub>2</sub> são anulados, induzindo quedas na produtividade.

Apesar de já existirem modelos de simulação de desenvolvimento de culturas em cenários climáticos futuros, essas ferramentas não exploram detalhes importantes do sistema fotossintético das plantas frente à variação da concentração de CO<sub>2</sub> do ambiente. Dessa forma, existe a necessidade de adaptação dos atuais modelos às variações que poderão ocorrer nos processos fotossintéticos nos cenários climáticos futuros.

Embora a alta concentração de CO<sub>2</sub> modifique indiretamente vários processos da planta, os efeitos diretos ocorrem nas enzimas bioquímicas que se manifestam em nível celular por meio da fotossíntese (Harley et al., 1992). Yin e Schapendonk. (2004) e Qiong et al. (2004) mostram a importância de quantificar essas mudanças na assimilação de CO<sub>2</sub> no crescimento das culturas, utilizando modelos em condições ambientais futuras.

Os modelos mecanicistas apresentados por Farquhar et al. (1980) e adaptados por Yin e van Lar (2005) derivam do conhecimento das relações entre vários tipos de moléculas envolvidas nos processos bioquímicos da fotossíntese. Esses modelos destacam-se por detalharem as reações bioquímicas dos processos, como a carboxilação e o transporte de elétrons, e também por terem como variável de entrada a temperatura foliar média (T<sub>m</sub>), considerada uma grande preocupação nos cenários futuros.

Harley et al. (1992) e Medlyn et al. (1999) estudaram as equações de fotossíntese de Farquhar et al. (1980) aplicadas à cultura do algodão e às florestas europeias, concluindo que as equações descreveram bem o processo de fotossíntese, nesses casos. Doi et al. (2010) realizaram estudos para testar respostas fenológicas de algumas culturas em função de temperaturas mais elevadas, encontrando grandes

interferências principalmente no ciclo da cultura. Renato (2009), usando as equações Farquhar et al. (1980) adaptadas por Yin e van Lar (2005), estudou o processo de fotossíntese e a produtividade da cana-de-açúcar em cenários futuros com aumento de temperatura. Nas simulações com o modelo ocorreu queda na produção nos cenários futuros. Apesar dos relatos registrados, pode-se afirmar que poucos são os trabalhos que exploram o comportamento direto do clima na fotossíntese e, conseqüentemente na produtividade, observando somente resultados pontuais de eventos extremos.

## **OBJETIVOS**

Neste trabalho, objetivou-se em construir um modelo a partir das equações de fotossínteses propostas por Farquhar et al. (1980) e adaptado por Yin e van Lar (2005) para analisar a influência das possíveis mudanças climáticas nos processos de fotossíntese e de produtividade para a cultura do feijoeiro.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Dados experimentais**

Os dados experimentais utilizados no desenvolvimento do presente trabalho foram obtidos a partir de um experimento 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 (Figura 1), foi conduzido por Silva (2010) no período de 16 de abril de 2009 a 27 de julho de 2009.

Para o enriquecimento do ar com CO<sub>2</sub> foram desenvolvidas câmaras de topo aberto, as quais eram compostas por módulos retangulares adicionados para acompanhar o desenvolvimento das plantas.

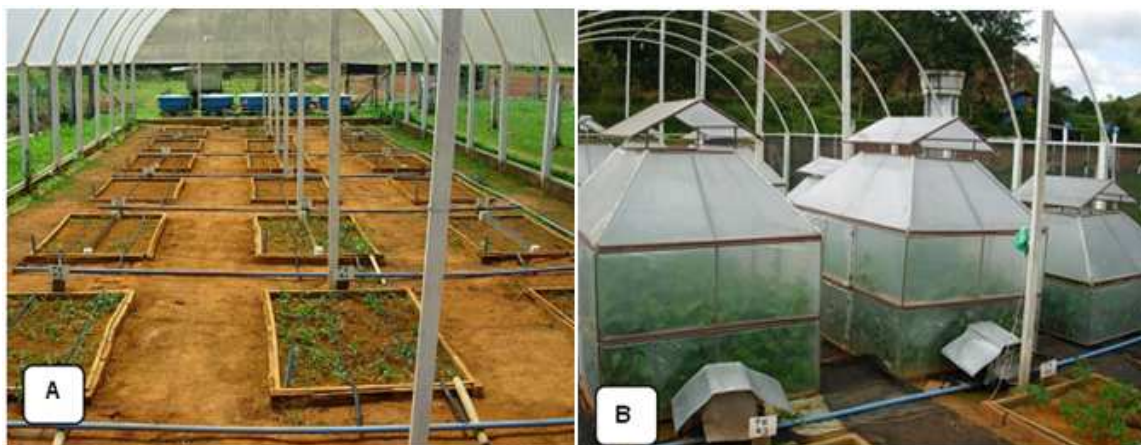


Figura 3.1. Fotos do experimento realizado por Silva (2010), com a cultura do feijoeiro em condições de aumento da concentração de CO<sub>2</sub>. (A) Início do experimento e (B) Experimento com as câmaras de CO<sub>2</sub>.

Duas concentrações de CO<sub>2</sub> (380 e 700ppm) nas câmaras foram monitoradas e ajustadas manualmente na parte da manhã a cada dois dias. O tempo de exposição das plantas à atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub> decorria diariamente das 6 às 18h.

Neste experimento, foram coletados dados utilizados para a calibração do modelo. Por meio de uma estação meteorológica automática portátil foram coletados dados de precipitação, radiação solar, temperatura ambiente e temperatura dentro das câmaras de hora em hora. 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  $\mu\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , foram realizadas medições da taxa fotossintética. Também, foram coletados dados fenológicos como altura máxima da planta, temperatura foliar, matéria seca da parte aérea e produtividade. Esses dados foram usados para calibrar o modelo aqui estudado.

## Desenvolvimento do modelo

Para a construção do modelo, foi utilizado o aplicativo Model Maker (ModelKinetix 2001). O modelo de fotossíntese foi desenvolvido baseado nas equações de Farquhar et al. (1980), adaptadas por Yin e van Lar (2005).

### a) Módulo cultura (Fotossíntese, respiração e partição de matéria seca)

#### Fotossíntese

Para o cálculo da fotossíntese bruta foram utilizadas as equações propostas por Farquhar et al. (1980), adaptadas por Yin e van Lar (2005). O modelo simula a fotossíntese em função da energia absorvida, temperatura foliar, capacidade da enzima Rubisco e concentração de CO<sub>2</sub>.

A fotossíntese é dada pela Equação 3.1:

$$P_p = 44 \times 10^{-6} \left( 1 - \frac{\tau}{C_c} \right) \min(V_c, V_j) \quad (3.1)$$

Em que,

$P_p$ : fotossíntese bruta (g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> folha s<sup>-1</sup>);

$V_c$ : taxa de carboxilação limitada pela enzima Rubisco (μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> folha s<sup>-1</sup>);

$V_j$  : taxa de carboxiliação limitada pelo transporte de elétron (μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> folha s<sup>-1</sup>);

$\tau$ : ponto de compensação da radiação fotossinteticamente ativa (μmol mol<sup>-1</sup>);

$C_c$ : concentração de CO<sub>2</sub> no sítio da Rubisco (μmol mol<sup>-1</sup>).

O ponto de compensação da radiação fotossinteticamente ativa ( $\tau$ ) é alcançado quando a assimilação fotossintética de CO<sub>2</sub> iguala-se à quantidade de CO<sub>2</sub> liberado pela respiração, calculado de acordo com a equação 3.2:

$$\tau_* = 0.5 \cdot e^{\frac{-3.3801+5220}{298R(T_m+273)}} \cdot \frac{O_i K_{mc}}{K_{mo}} \quad (3.2)$$

em que,

T<sub>m</sub>: Temperatura média do ar (°C);

K<sub>mc</sub> e K<sub>mo</sub>: Constantes de Michaelis-Mentem para o CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>, respectivamente (μmol mol<sup>-1</sup>);

R: Constante universal dos gases (J K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>);

O<sub>i</sub>: Concentração de oxigênio intercelular (mol mol<sup>-1</sup>);

Com o aumento da luz acima do ponto de compensação, a fotossíntese aumenta até ser limitada pela capacidade de carboxilação da Rubisco ou pelo metabolismo das trioses fosfato. A taxa de carboxilação limitada pela Rubisco (V<sub>c</sub>) é calculada pela Equação 3.3:

$$V_c = V_{c\max} C_c / [C_c + K_{mc} (1 + O_i / K_{mo})] \quad (3.3)$$

em que,

V<sub>cmax</sub>: capacidade máxima da enzima Rubisco para realização da função carboxilase (μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> folha s<sup>-1</sup>).

Para o cálculo da capacidade máxima da enzima Rubisco ( $V_{c\max}$ ) e das constantes de Michaelis-Mentem ( $K_{mc}$  e  $K_{mo}$ ) foram utilizadas as equações, 3.4, 3.5 e 3.6 respectivamente ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ).

$$V_{c\max} = V_{c\max 25} e^{\frac{[(Tm-25)E_{Vc\max}]}{298R(Tm+273)}} \quad (3.4)$$

$$K_{mc} = K_{mc 25} e^{\frac{[(Tm-25)E_{Kmc}]}{298R(Tm+273)}} \quad (3.5)$$

$$K_{mo} = K_{mo 25} e^{\frac{[(Tm-25)E_{Kmo}]}{298R(Tm+273)}} \quad (3.6)$$

Em que,

$V_{c\max 25}$ : capacidade máxima da enzima Rubisco para a realização da função carboxilase a temperatura de 25°C ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ folha s}^{-1}$ ).

$K_{mc 25}$  e  $K_{mo 25}$ : Constantes de Michaelis-Mentem para o  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  a 25°C, respectivamente ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ );

$E_{Vc\max}$ ,  $E_{kmc}$  e  $E_{kmo}$ : Energias de ativação para  $V_{c\max}$ ,  $K_{mc}$  e  $K_{mo}$ , respectivamente ( $\text{J mol}^{-1}$ ).

A taxa de carboxilação limitada pelo transporte de elétrons ( $V_j$ ) depende da eficiência quântica da planta, sendo calculada de duas formas devido às diferenças entre as culturas  $C_3$  e  $C_4$ , conforme apresentadas nas equações 3.7a e 3.7b, respectivamente. Como o feijão é uma cultura  $C_3$ , foi utilizada no modelo a equação 3.7b.

$$V_j = j_2 \frac{(2 + f_Q - f_{cyc})C_c}{h \left[ \frac{2(C_c - \tau_*)}{(1 - \phi) + (3C_c + 7\tau_*)} \right] (1 - f_{cyc})} \quad (3.7a)$$

$$V_j = j_2 \frac{(2 + f_Q - f_{cyc})C_c}{h(3C_c - 7\tau_*)(1 - f_{cyc})} \quad (3.7b)$$

Em que,

$j_2$ : taxa de transporte de elétrons ( $\mu\text{mol eletron m}^{-2}$  folha  $\text{s}^{-1}$ );

$\phi$ : razão de carboxilação da PEP ( $\text{mol mol}^{-1}$ );

$h$ : número de prótons para produção de 1 mol de ATP ( $\text{mol mol}^{-1}$ );

$f_{cyc}$ : fração de transporte de elétrons do fluxo cíclico do fotossistema;

$f_Q$ : fração de transporte de elétrons que segue o ciclo-Q.

$f_{cyc}$ ,  $f_{pseudo}$  e  $f_Q$  são as relações de transportes de elétrons no ciclo da fotossíntese e devem satisfazer a Equação 3.8:

$$1 - f_{cyc} - f_{pseudo} = + \frac{(4C_c + 8\tau_*)(2 + f_Q - f_{cyc})}{h(3C_c + 7\tau_*)} \quad (3.8)$$

O limite superior de  $J_2$  ( $J_{max}$ ) deve satisfazer as Equações 3.9 e 3.10:

$$\theta J_2^2 - (\alpha_2 I + J_{max}) J_2 + \alpha_2 I J_{max} = 0 \quad (3.9)$$

$$\alpha_2 = \frac{1 - f_{cyc}}{1 + (1 - f_{cyc}) / \phi_{2m}} \quad (3.10)$$

em que:

$I$ : lamela do cloroplasto ( $\mu\text{mol m}^{-2}$  folha  $\text{s}^{-1}$ );

$\alpha_2$ : eficiência quântica intrínseca da planta;

$\theta$ : ponto de conversão da curva de resposta.

### Respiração

A respiração de manutenção representa a quantidade de energia necessária para a manutenção dos processos fisiológicos da cultura. Para o cálculo da respiração de manutenção ( $R_m$ ), foi utilizada a equação de McCree (1974) como função tanto do peso seco acumulado da cultura ( $W_{\text{acum}}$ ) quanto da variação de temperatura (equação 3.11).

$$R_m = r_m \times W_{\text{acum}} \times Q_{10}^{\frac{(T_m - t_b)}{10}} \quad (3.11)$$

em que,

$R_m$ : respiração de manutenção ( $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ );

$r_m$ : coeficiente da respiração de manutenção ( $\text{gCO}_2 \text{ gMS}^{-1} \text{ d}^{-1}$ );

$Q_{10}$ : fator de incremento da manutenção;

Os coeficientes de respiração de manutenção foram diferentes para cada órgão da planta, de acordo com Costa et al. (2009).

### Desenvolvimento e partição de matéria seca

Para o estudo do desenvolvimento da cultura, foi utilizada a metodologia do cálculo dos graus-dia de acordo com a equação proposta por Ometto (Tabela 3.1). Nesse método, o cálculo dos graus-dia, além de considerar a temperatura basal inferior ( $T_b$ ), considera também a temperatura basal superior ( $T_B$ ).

Tabela 3.1. Equações para o cálculo dos graus-dia (GD) de acordo com o método proposto por Ometto (1981).

Condição	Equação	
TB>TM>Tm>Tb	$GD = \frac{TM - Tm}{2} + Tm - Tb$	(3.12)
TB>TM>Tb>Tm	$GD = \frac{(TM - Tb)^2}{2(TM - Tm)}$	(3.13)
TB>Tb>TM>Tm	GD = 0	(3.14)
TM>TB>Tm>Tb	$GD = \frac{2(TM - Tm)(Tm - Tb) + (TM - Tm)^2 - (Tm - TB)^2}{2(TM - Tm)}$	(3.15)
TM>TB>Tb>Tm	$GD = \frac{1}{2} \cdot \frac{(TM + Tb)^2 - (TM - TB)^2}{Tm - Tm}$	(3.16)

Em que,

TM = temperatura máxima do dia, °C

Tm = temperatura mínima do dia, °C

Tb = temperatura basal inferior, °C

TB = temperatura basal superior, °C

As áreas foliares das culturas foram acumuladas ao longo de seu crescimento . O índice de área foliar (IAF) considerado foi calculado com base na área foliar específica (AFE) e a partição de matéria seca para as folhas (PF), que varia ao longo do estágio de desenvolvimento da planta.

$$IAF = AFE \times PF \quad (17)$$

Em que,

AFE: área foliar específica ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ ); e

PF: partição da matéria seca para as folhas ( $\text{g m}^{-2}$ ).

A partição da matéria seca foi feita de acordo com os coeficientes utilizados por Costa et.al (2009).

#### b) Módulo Climático

Para a alimentação do modelo, foram utilizados dados meteorológicos diários. As variáveis utilizadas foram temperatura do ar e concentração de  $\text{CO}_2$ .

As primeiras simulações foram feitas com os dados de temperatura observados para a cidade de Viçosa durante os meses de abril a julho de 2009, período correspondente ao experimento realizado para a cultura do feijoeiro. Os valores da temperatura média de Viçosa, durante este período, estão apresentados na Figura 3.2.

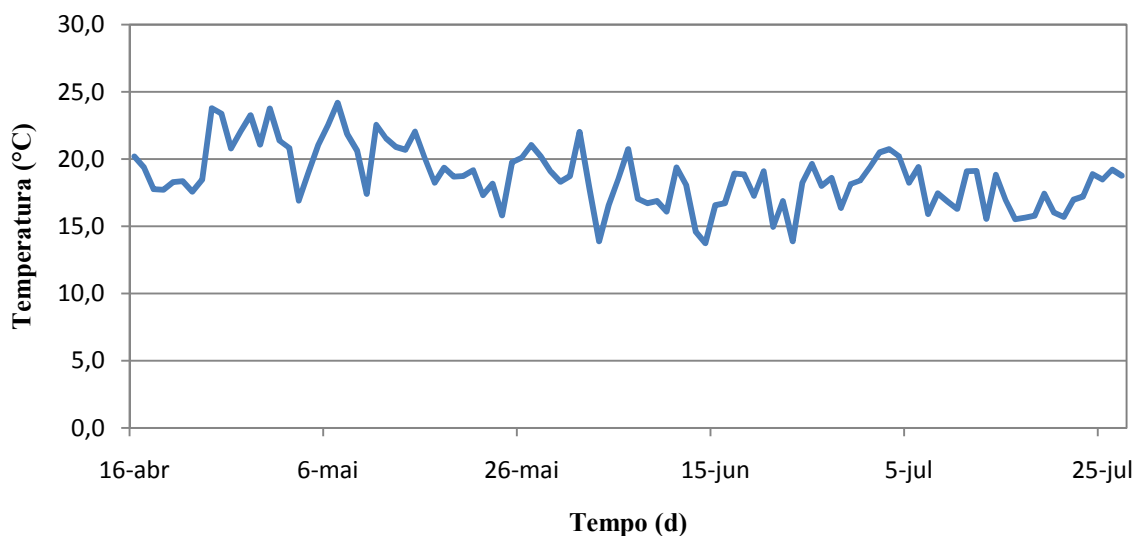


Figura 3.2. Temperaturas médias de Viçosa nos meses de abril a julho de 2009.

Depois desses testes, foram feitas as simulações do desenvolvimento da cultura em condição de temperatura elevada, considerando-se o aumento de temperatura de 1, 2, 3 e 5°C.

As simulações supracitadas foram feitas depois do desenvolvimento de uma sub-rotina específica para tal fim. A sub-rotina desenvolvida partiu dos dados de temperatura máxima e mínima observados, durante o experimento, sendo que, em cada valor diário observado, foram somados números aleatórios entre 0 e 2°C (primeira série), 0 e 4°C (segunda série), 0 e 6°C (terceira série) e 0 e 10°C (quarta série). A geração aleatória foi feita no programa Excel, de maneira que os aumentos nas médias das temperaturas para as séries foram de 1, 2, 3 e 5°C, respectivamente.

Foram, também, feitas simulações com variações nas concentrações de CO<sub>2</sub>. O modelo foi testado mantendo-se as temperaturas medidas (observadas) de Viçosa durante o experimento, testando-se as concentrações de CO<sub>2</sub> ambiente de 380 e 700 ppm.

Por fim, foram feitas simulações com variações na temperatura e concentrações de CO<sub>2</sub> ambiente simultaneamente.

### **Calibração do modelo**

Para a calibração do modelo, foram usados dados obtidos no experimento citado anteriormente (Silva, 2010).

A área foliar específica (AFE) foi estimada durante o experimento, sendo equivalente ao quociente da área foliar total pela massa das folhas. Não foram observadas variações ao longo do ciclo da cultura. Apenas variações entre o feijão cultivado com concentração de CO<sub>2</sub> atual e concentração de CO<sub>2</sub> aumentada (700 ppm).

O teor de nitrogênio na folha foi medido durante o experimento citado e houve uma grande variação durante todo o ciclo de 1,3 a 0,41, g m<sup>-2</sup> por folha. Esta diminuição, ao longo do desenvolvimento do feijão, está associada à realocação do nitrogênio para a formação de grãos no fim do ciclo (Fageria, 1997).

Por ser um parâmetro extremamente sensível, o modelo foi então alimentado com dados diários de nitrogênio na folha. Foram feitas medições semanalmente. Nos dias em que não ocorreram medições, a série foi preenchida considerando um decaimento linear.

A partir da regressão dos dados coletados pelo IRGA, foi obtida uma relação entre a concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente (Ca) e a concentração de CO<sub>2</sub> interna, no mesofilo (Ci). Assim, foi possível obter o coeficiente para o cálculo da concentração de CO<sub>2</sub> no sítio de carboxilação da rubisco (Cc). O valor da Cc usado no modelo foi equivalente 89% da concentração ambiente (Ca).

Durante o experimento, foram feitas quatro medições das taxas fotossintéticas, que foram comparadas com as simuladas.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Resposta da cultura do feijoeiro em condições de aumento de temperatura**

Os resultados das taxas fotossintéticas simuladas pelo modelo estudado, com as diferentes condições de temperatura, junto aos pontos medidos durante o experimento estão apresentados na Figura 3.3.

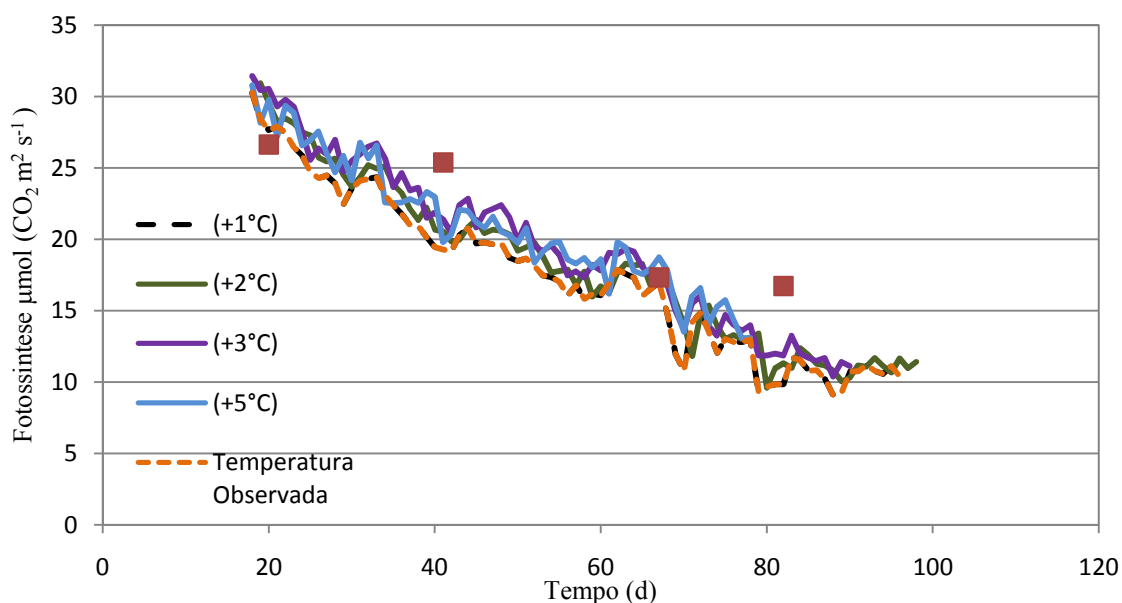


Figura 3.3. Taxas fotossintéticas simuladas levando-se em conta as temperaturas observadas e simuladas em Viçosa.

Na primeira etapa (estádio vegetativo), as taxas fotossintéticas são mais altas quando comparados com o final do ciclo. Isso está relacionado diretamente com o teor de nitrogênio na folha, que diminui também durante o ciclo. Essa diminuição do N na fase final do desenvolvimento está relacionada com sua realocação, que, nesta fase, é direcionado para a formação dos grãos (Fageria et al. 1997).

A elevação na temperatura diária não resultou em aumento nas taxas fotossintéticas da cultura do feijoeiro. As plantas do tipo C<sub>3</sub>, como é o caso do feijoeiro, apresentam respostas distintas das plantas C<sub>4</sub>, em condições de aumento de temperatura. Por não possuírem mecanismos de concentração de carbono, as plantas C<sub>3</sub> apresentam incremento na fotorrespiração (resultado da atividade de oxigenase da rubisco), com o aumento da temperatura ambiente. Dessa maneira, embora o acréscimo na temperatura possa resultar no aumento da carboxilação, também estimula a fotorrespiração. Conseqüentemente, não se observam grandes alterações nas taxas fotossintéticas (Taiz e Zieger, 2010).

Com relação à produtividade final, no caso da elevação de 1°C na temperatura do ar, o modelo não apresentou mudança no desenvolvimento da planta ao longo do tempo. Porém, quando se aumentou ainda mais a temperatura, observou-se uma queda na produção total, diretamente ligada ao aumento das taxas respiratórias e principalmente ao encurtamento do ciclo da cultura.

Quando a simulação foi feita, considerando-se o aumento da temperatura, observou-se que existe queda na produtividade, que se dá principalmente pela diminuição do ciclo da cultura (Figura 3.4). O ciclo da cultura, inicialmente de 100 dias, chegou a ser reduzido para 75 dias na simulação com acréscimo de 5°C. Essa redução de 25% no tamanho do ciclo da cultura resultou em queda de 51% na produtividade.

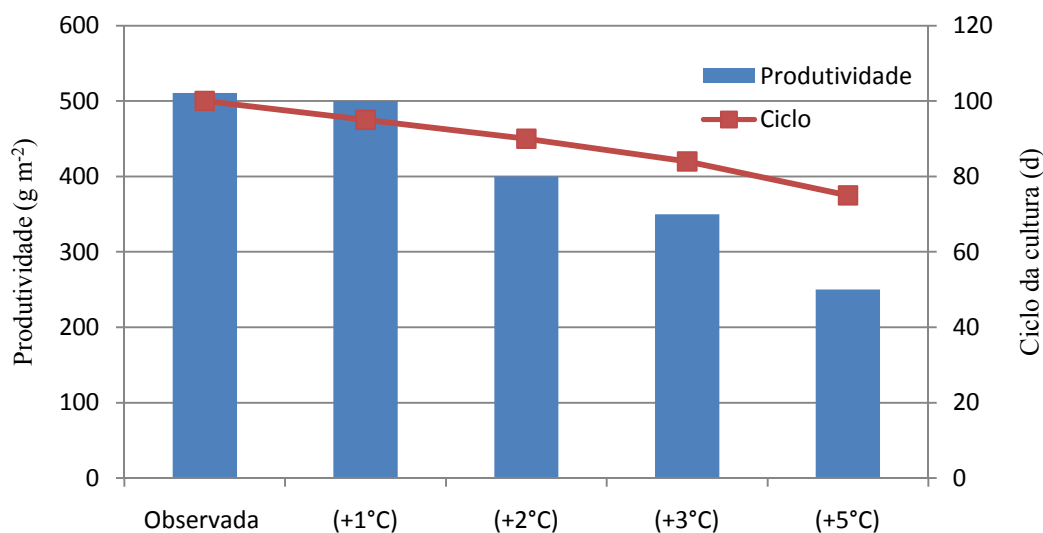


Figura 3.4. Produtividade final gerada pelo modelo de simulação com a temperatura observada em Viçosa durante o experimento e com as temperaturas aumentadas e o tamanho de ciclo da cultura em cada simulação.

O modelo foi alimentado com valores medidos de nitrogênio durante o experimento, porém observou-se, ao longo do ciclo, uma queda grande desse teor de nitrogênio na folha. Quando a simulação foi feita com o aumento de temperatura o teor de nitrogênio na simulação foi mantido; como o ciclo da cultura chegou a diminuir 23 dias, os valores de nitrogênio na folha considerados no final do ciclo foram aquela concentração equivalente ao observado. Isso interferiu um pouco nos resultados, amenizando a queda de produtividade em cenários com temperaturas muito elevadas. Dessa forma, as plantas podem apresentar maiores quedas nas produtividades, já que os resultados aqui podem estar amenizados.

Os resultados aqui encontrados (Figura 3.4) estão de acordo com Streck e Alberto (2006), que estudaram o feijoeiro sob condições de altas temperaturas. Os autores relatam que, nas condições estudadas, houve encurtamento do ciclo da cultura e consequentemente uma diminuição na produção de grãos. Costa et. al. (2009) também

encontraram uma queda na produtividade 30% em uma projeção considerando os aumentos na temperatura esperados para o ano de 2050.

### Comportamento da cultura do feijoeiro em condições de aumento de CO<sub>2</sub>

As respostas das taxas fotossintéticas simuladas pelo modelo nas condições de concentração de CO<sub>2</sub> atual (380 ppm) e em condição de aumento dessa concentração para 700 ppm podem ser observadas na Figura 3.5.

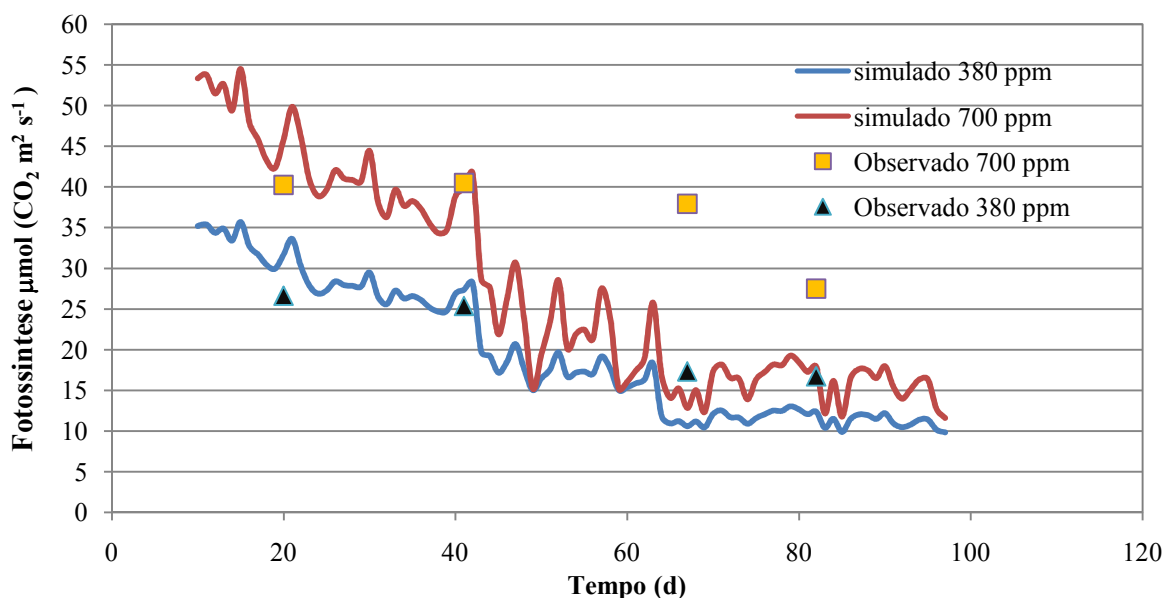


Figura 3.5. Taxas fotossintéticas medidas durante o experimento e simuladas, considerando a temperatura observada e as diferentes condições de concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera (380 ppm e 700 ppm).

Na Figura 3.5, além dos valores simulados pelo modelo, visualizam-se os pontos medidos durante o experimento. Entretanto, cabe ressaltar que apenas foram realizadas quatro medições ao longo do experimento. Os valores medidos mostram que, com o aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, houve também aumento nas taxas fotossintéticas, resultado semelhante ao simulado pelo modelo.

Existe uma diferença no terceiro valor medido da taxa fotossintética para o valor simulado, porém como se dispõe de poucas medições, não se pode avaliar por esse valor isoladamente, sendo oportuno considerar a resposta geral da fotossíntese (Figura 3.5). Nesse caso, verifica-se que a taxa fotossintética aumentou com a elevação das concentrações de CO<sub>2</sub> e que houve sempre uma queda no fim do ciclo devido a diminuição do teor de nitrogênio na folha.

Esse aumento na concentração de CO<sub>2</sub> ambiente tem uma resposta positiva nas taxas fotossintéticas para a cultura do feijoeiro, facilmente explicada quando se observa que trata-se de uma cultura do tipo C3 (Taiz e Zieger, 2010).

As culturas do tipo C3, diferentemente das plantas C4, não possuem mecanismo de concentração de CO<sub>2</sub> por meio da enzima fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPCase). Essas plantas utilizam o CO<sub>2</sub> diretamente do ambiente pela ação carboxilativa da enzima ribulose 1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco) (Taiz e Zieger, 2010). Dessa forma, um aumento na concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico favorece o mecanismo de carboxilase da enzima em detrimento a função de oxigenase.

Essa elevação nas taxas fotossintéticas também foram encontradas por Ainsworth e Long (2005), que, em estudos de revisão sobre diferentes experimentos com aumento de CO<sub>2</sub>, de 475 a 600 ppm, verificaram aumentos em 28% nas taxas fotossintéticas com o acréscimo de CO<sub>2</sub>.

Os aumentos nas taxas de fotossíntese resultaram, no caso estudado, em aumento na produtividade final do feijoeiro (Figura 3.6).

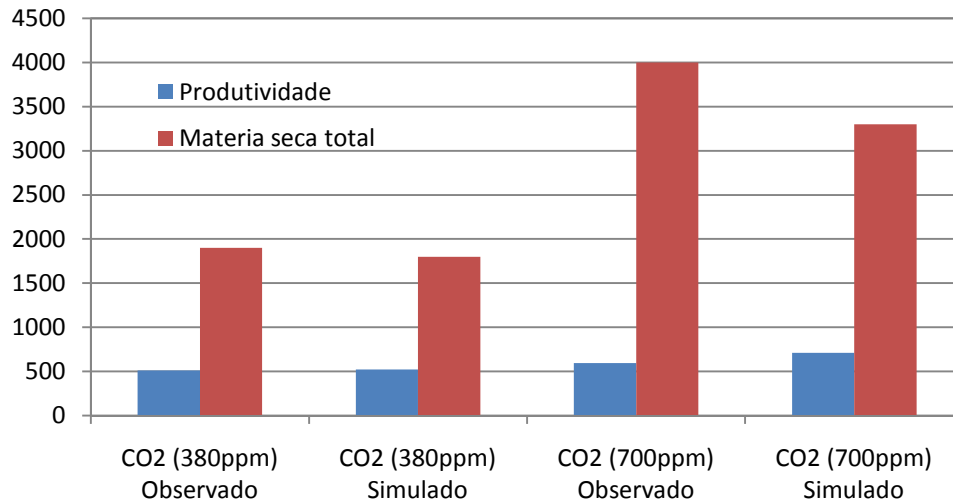


Figura 3. 6. Matéria seca total e matéria seca dos grãos (produtividade) (g m<sup>-2</sup>) medidas durante o experimento e simuladas pelo modelo nas condições de concentração de CO<sub>2</sub> atual (380 ppm) e aumentada (700 ppm).

Tanto no experimento, como no modelo de simulação, a matéria seca total e a produtividade (matéria seca dos grãos por área cultivada) apresentaram um acréscimo quando à concentração de CO<sub>2</sub> ambiente aumentou.

Quando foi simulada a matéria seca dos grãos com o CO<sub>2</sub> ambiente (380 ppm) e com a concentração de CO<sub>2</sub> elevada (700 ppm) ,observou-se um acréscimo de 35% na produtividade.

Os resultados aqui encontrados estão de acordo com os relatados por Pooter e Navas (2003). Eles encontraram um incremento de biomassa de 45% nas plantas herbáceas C<sub>3</sub> quando submetidas em condições de CO<sub>2</sub> elevado. Wand et. al (1999), em estudo com gramíneas C<sub>3</sub> observaram um aumento de 33% em condições de aumento na concentração de CO<sub>2</sub>; resultados muito similares aos encontrados neste trabalho.

## **Incremento simultâneo da concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura na cultura do feijoeiro**

Como ressaltado nas seções anteriores (Figuras 3.3 a 3.6), observou-se que o acréscimo da concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente favoreceu o desenvolvimento da cultura do feijoeiro, aumentando as taxas fotossintéticas e, conseqüentemente aumento na produtividade. Porém, quando foi submetido ao cenário de aumento na temperatura, o mesmo resultado não foi observado, uma vez que a elevação da temperatura diminuiu o ciclo da cultura.

Quando o modelo é testado aumentando-se simultaneamente a concentração de CO<sub>2</sub> ambiente e a temperatura do ar, os efeitos benéficos percebidos das taxas fotossintéticas pelo aumento do CO<sub>2</sub> são perdidos quando o aumento na temperatura passa a ser maior que 2°C acima da temperatura ambiente (Tabela 3.3).

Figura 3.7. Matéria seca de grãos do feijoeiro simulada pelo modelo em diferentes condições.

Simulação	Matéria seca de grãos (g m <sup>2</sup> )
CO <sub>2</sub> 380 ppm	523
CO <sub>2</sub> 700 ppm	710
CO <sub>2</sub> 700 ppm+Temperatura (1°C)	695
CO <sub>2</sub> 700 ppm + Temperatura (2°C)	515
CO <sub>2</sub> 700 ppm + Temperatura (3°C)	480
CO <sub>2</sub> 700 ppm + Temperatura (5°C)	315

Os resultados supracitados estão de acordo com o reportado por Streck (2005), que ao estudar o aumento de CO<sub>2</sub> em duas vezes a concentração atual, sem acréscimo de temperatura, obteve um salto na produção, em torno de 30%, para culturas C<sub>3</sub>. No

entanto, com a elevação na temperatura, o autor relata que os efeitos benéficos do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> podem ser anulados. Em experimentos com a cultura do feijoeiro, Lambreva et. al. (2005) mostram que, em temperaturas de 23°C, o aumento na concentração de CO<sub>2</sub> foram benéficos para a cultura, porém em altas temperaturas (39°C), os efeitos das altas concentrações de CO<sub>2</sub> são anulados, induzindo quedas na produtividade.

## **CONCLUSÕES**

O modelo de simulação estudado a partir das equações de Faqhuar et al. (1981) torna-se uma ferramenta interessante para o estudo das taxas fotossintéticas e produtividade final do feijão em condições de temperatura e concentração de CO<sub>2</sub> elevados.

Para a cultura do feijoeiro submetida em condições de CO<sub>2</sub> elevado (700 ppm), há um ganho na produtividade dos grãos de 35%. Já quando o modelo simulou com aumento de temperatura (a partir de acréscimos de 2°C), os resultados na produtividade não foram positivos, resultando em menores valores, devido principalmente ao encurtamento do ciclo da cultura. Quando a simulação foi feita com o aumento de temperatura e concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico simultaneamente, os efeitos benéficos do CO<sub>2</sub> são perdidos com o acréscimo da temperatura.

## REFERÊNCIAS

AINSWORTH, E.A. E 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.

COSTA, L. C., JUSTINO, F. B., OLIVEIRA, L. J. C., SEDIYAMA, G. C., FERREIRA, W. P. M. e 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.

DIDONET A.D. Acumulo de biomassa, nitrogênio e temperatura na definição do rendimento de grãos de feijão. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e feijão 2002. p Relatório de acompanhamento período 2001.

DOI, H.; TAKAHASH, M.; ATANO, U. Genetic diversity increases regional variation in phenological dates in response to climate change. **Global Change Biology** v. 16, p. 373–379, 2010.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; JONES, C.A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. 2<sup>nd</sup>ed. New York: M. Dekker, 1997. 624p.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 360p. 2008.

FARQUHAR, G.D., VON CAEMMERES, S. AND BERRY, J.A., A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. **Planta** v.149, p. 78-90, 1980.

GONÇALVES, S.L. et al. Probabilidade de ocorrência de temperaturas superiores a 30°C no florescimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L), cultivado na safra das águas no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.99-107, 1997.

HARLEY, C.; THOMAS, R. B.; REYNOLDS, J.F.; STRAIN, B.R. Modelling photosynthesis of cotton grown in elevated CO<sub>2</sub>. **Plant, Cell and Environment** v.15, p. 271-282, 1992.

LAMBREVA, M.; STOYANOVA-KOLEVA, D.; BALDJIEV, G.; TSONEV, T. Early acclimation changes in the photosynthetic apparatus of bean plants during short-term exposure to elevated CO<sub>2</sub> concentration under high temperature and light intensity. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, n° 106, p. 219 – 232, 2005.

MAPA Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento –Agronegócio feijão: relatórios e estatísticas. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>

McCREE, K. J. Equations for the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum, as function of dry weight, photosynthesis rate and temperature. **Crop Science**, Madison, v.14, p.509-514, 1974.

MEDLYN, B. E.; BADECK, F. W.; DE PURY, D. G. G.; BARTON, C. V. M.; BROADMEADOW, M.; CEULEMANS, R.; DE ANGELIS, P.; FORSTREUTER, M.; JACH, M. E.; KELLOMÄKI, S.; LAITAT, E.; MAREK, M.; PHILIPPOT, S.; REY, A.; STRASSEMAYER, J.; LAITINEN, K.; LIOZON, R.; PORTIER, B.; ROBERNTZ, P.; WANG, K.; JSTBID, P. G. Effects of elevated [CO<sub>2</sub>] on photosynthesis in European forest species: a meta-analysis of model parameters. : **Plant, Cell & Environment**, v. 22, p. 1475-1495, 1999.

OMETTO, J. C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo: Agronômica Ceres 1981. 440p.

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.

POORTER H. E NAVAS M. L. Plant growth and competition at elevated CO<sub>2</sub> : winners ,losers and functional groups. *New Phytologist*, 157,175–198, 2003.

QIONG, G., ZHANG, X., Huang, Y., Xu, H., A comparative analysis of four models of photosynthesis for 11 plant species in the loess Plateau, **Agricultural and forest meterology**, v.126, p. 2003-222, 2004.

RENATO, N. S. Fotossínteses **em cenários de mudanças climáticas: adaptação de modelo para a produtividade potencial da cana-de-açúcar**, Dissertação, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 53p, 2009.

SHONNARD, G.C.; GEPTS, P. Genetic of heat tolerance during reproductive development in common bean. **Crop Science**, Madison, v.34, n.5, p.1168-1175, 1994.

SILVA, J. B. L. **Respostas das culturas de feijão submetido ao estresse hídrico e de milho em atmosfera enriquecida com CO<sub>2</sub>**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. **Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho**. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, vol. 41, nº 9, p. 1351 – 1359, set. 2006.

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, vol. 35, nº 3, p. 730 – 740, 2005.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 5.ed. Sunderland Sinauer Associates, 782 p, 2010.

TÉRAN, H.; SINGH, S. P. Comparison of Sources and Lines Selected for Drought Resistance in Common Bean. **Crop Science** v. 42 p. 64-70, 2002.

VIEIRA, C.; PAULA JÚNIOR, T.J.; BORÉM A. **Feijão**. Editora UFV. Universidade Federal de Viçosa. 2006.

WAND S.J.E., MIDGLEY G.F., JONES M.H. AND CURTIS P.S. Responses of wild C3 and C4 grasses (Poaceae) to elevated atmospheric CO2 concentration: a meta-analytic test of current theories and perceptions. **Climate**, 1999.

Change Biology 5, 723-741.

YIN, X., SCHAPENDONK, A.H.C.M, Simulating the partitioning of biomass and nitrogen between root and shoot in crop and grass plants. NJAS-Wageningen **Journal of Life Sciences** v. 51, p.. 407-426, 2004.

YIN, X., VAN LAAR. H. H, Crop Systems Dynamics an ephysiological simulation model for genotype-by-environment interactions, **Wageningen Academic Publishers**, The Netherlands, 2005.

## CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES

Observou-se um comportamento diferente ao se modelarem as taxas fotossintéticas e a produtividade das culturas do milho e do feijão em condições de aumento de temperatura e concentração de CO<sub>2</sub> ambiente.

Em relação à cultura do milho, não se observou ganhos com o aumento de CO<sub>2</sub>. Por ser uma cultura do tipo C4, as concentrações de CO<sub>2</sub> ambiente são consideradas suficientes para as funções de carboxilação. Já na cultura do feijão, observaram-se ganhos consideráveis, quando se simulou em conjunto com o aumento de CO<sub>2</sub>, observando-se aumento nas taxas fotossintéticas e, conseqüentemente, na produtividade da cultura.

Sobre condições de temperaturas elevadas, o milho apresentou um aumento nas taxas fotossintéticas. Porém, quando esse acréscimo foi maior que 2°C, o aumento das taxas respiratórias e o encurtamento do ciclo da cultura causaram uma diminuição na produtividade final. Em relação à cultura do feijão, a elevação de temperatura não proporcionou aumentos nas taxas fotossintéticas; entretanto observou-se aumento nas taxas respiratórias e encurtamento do ciclo da cultura, com a conseqüente diminuição da produtividade.

O modelo abordado pode ser considerado uma interessante alternativa para estudar o comportamento das culturas do milho e do feijão em condições de aumento de temperatura e concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico. O modelo tem um diferencial importante: trata detalhadamente das relações das variáveis de entrada com as taxas diárias de fotossíntese, antes do cálculo da produtividade final.

Por ter sido calibrado com os dados de um único experimento realizado em Viçosa, ainda não é razoável que se façam grandes extrapolações. Outra limitação desse

modelo é o fato de que alguns parâmetros de entrada para o cálculo da fotossíntese são difíceis de serem medidos, sendo necessário o uso de valores da literatura. Entretanto, esses resultados, juntos a outros experimentos e outros modelos, podem melhorar a modelagem dessas culturas de uma maneira geral.

Com base nos resultados aqui reportados e na experiência com a condução deste trabalho, algumas sugestões podem ser elaboradas:

- Uma maior quantidade de experimentos controlados com variações de temperatura e concentração de CO<sub>2</sub> ambiente. Apesar das dificuldades, a implantação desses testes vem ficando mais acessível.

- Durante os experimentos, mais medidas de taxas fotossintéticas poderiam ser realizadas.

- Os resultados aqui gerados pelo modelo estudado podem ser analisados junto a outros modelos já consolidados na literatura.