

Modelo fotossintético para simulação da produtividade do milho em condições de temperatura e CO₂ elevados

Photosynthetic model for simulation of maize productivity under high temperature and CO₂ conditions

Natalia S. Renato^{1*}, Gilberto C. Sedyama¹, João B. L. da Silva² e Eduardo G. Pereira³

¹Departamento de Engenharia Agrícola/ Universidade Federal de Viçosa/Viçosa-MG Brasil

²Instituto de Humanidades Artes e Ciências/ Universidade Federal do Sul da Bahia /Teixeira de Freitas-BA Brasil

³Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde/ Universidade Federal de Viçosa/Florestal-MG Brasil

(*E-mail: natalia.renato@ufv.br)

<http://dx.doi.org/10.19084/RCA18047>

Recebido/received: 2018.02.23

Recebido em versão revista/received in revised form: 2018.06.11

Aceite/accepted: 2018.07.03

RESUMO

Objetivou-se neste trabalho construir um modelo de simulação para se estudar os efeitos da temperatura e do CO₂ elevados na fotossíntese e na produtividade do milho. O modelo foi baseado em processos de reações bioquímicas, sendo utilizado dados experimentais para calibração do mesmo. Os resultados das taxas fotossintéticas simuladas, para concentrações de CO₂ de 380 e 700 ppm foram semelhantes. Em relação à produtividade de matéria seca, observou-se um acréscimo de 5% quando a simulação foi feita com 700 ppm. Em condições de aumento da temperatura do ar, observou-se que as taxas fotossintéticas aumentaram consideravelmente, chegando a um limite no qual não se detectaram mais ganhos. Para a produtividade, os resultados foram positivos nas simulações com acréscimos de até 2 °C. Entretanto, quando foi feita a simulação para o cenário com temperaturas mais elevadas, a planta respondeu negativamente devido ao aumento das taxas respiratórias e à diminuição do ciclo, o que, conseqüentemente, resultou em menor tempo de crescimento e desenvolvimento.

Palavras-chave: dióxido de carbono, milho, modelagem, taxa fotossintética.

ABSTRACT

The objective of this work was to build a simulation model in order to study the effects of weather conditions on photosynthesis and grain yield. The model compiled was based on biochemical reaction processes, being using experimental data for the calibration model. The results of the photosynthetic rates simulated for CO₂ concentrations of 380 ppm and 700 ppm were similar. Regarding the dry matter yield, there was a 5% increase when the simulation was made with 700 ppm. In terms of increasing air temperature, it was observed that the photosynthetic rate increased substantially, reaching a limit at which no further significant gains were detected. For productivity, the results were positive in the simulations with increases of up to 2 °C. However, when the simulation made to the scenario with higher temperatures, the plant responded negatively due to increased respiratory rates and reduced crop cycle, which consequently resulted in less time for growth and development.

Keywords: carbon dioxide, modelling, maize, photosynthesis rate.

INTRODUÇÃO

As mudanças nas temperaturas e na concentração de dióxido de carbono [CO₂] da atmosfera tem sido motivo de preocupação mundial. A agricultura, sem dúvida, pode sofrer alterações, por ser altamente dependente destes fatores climáticos

(Detomini *et al.*, 2012). O milho, por ser uma planta C₄, deve apresentar pouco ou nenhum crescimento adicional em resposta às elevadas [CO₂]. Leakey *et al.* (2004) afirmaram que efeitos de [CO₂] elevados nas plantas de milho não estão suficientemente compreendidos para permitir previsões futuras às mudanças climáticas.

Os modelos de simulações para estudar o comportamento de culturas em diferentes condições climáticas é uma ferramenta atualmente bastante utilizada (Ergamaschi *et al.*, 2013; Bezerra e Levinen, 2014). Apesar de já existirem modelos de simulação do crescimento das culturas em possíveis cenários climáticos futuros (Cai *et al.*, 2016; Streck e Alberto, 2006), essas ferramentas geralmente não exploram detalhes importantes do sistema fotossintético das plantas numa situação de variação da [CO₂] ambiental. Dessa forma, existe a necessidade de adaptação dos modelos às variações que ocorrem nos processos fotossintéticos. Yin e Schapendonk (2004) mostraram a importância de quantificar essas mudanças na assimilação de CO₂ e seus efeitos no crescimento das culturas utilizando modelos em condições ambientais futuras.

Os modelos mecanicistas apresentados no trabalho de 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_m), considerada uma grande preocupação em cenários futuros. Neste trabalho, pretendeu-se construir e testar, um modelo, para analisar a influência das mudanças climáticas, como o aumento de temperatura e [CO₂], nos processos fotossintéticos e na produtividade da cultura do milho.

MATERIAL E MÉTODOS

Foi construído um modelo baseado nas equações de Yin e van Laar (2005), para melhor descrever as influências das variáveis temperatura e [CO₂] na fotossíntese e na produtividade do milho. Para calibração do modelo foram usados dados experimentais em condições de aumento das variáveis.

Dados experimentais

Os dados experimentais, utilizados no desenvolvimento do presente trabalho, foram obtidos por Silva *et al.* (2012), que verificaram experimentalmente, em câmaras de topo aberto, alguns efeitos

de altas concentrações (380 e 700 ppm) de dióxido de carbono na cultura do milho. Foram utilizados para a calibração deste modelo os dados meteorológicos (radiação solar e temperatura) e fenológicos (altura máxima da planta), fisiológicos (temperatura foliar e fotossíntese) e agronômicos (matéria seca e produtividade) conforme descritos por Silva *et al.* (2012).

Desenvolvimento do modelo

Para a construção do modelo foi utilizado o aplicativo Model Maker (ModelKinetix). O modelo de fotossíntese foi desenvolvido baseado nas equações de Farquhar apresentadas no trabalho de Yin e van Laar (2005).

O cálculo da fotossíntese bruta foi feito em função da energia absorvida, temperatura foliar, capacidade da enzima ribulose-1,5 bifosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco) e a concentração de CO₂ (Eq. 1).

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

P_p – fotossíntese bruta (g CO₂ m⁻² folha s⁻¹);

V_c – taxa de carboxilação limitada pela enzima Rubisco (μmol CO₂ m⁻² folha s⁻¹);

V_j – taxa de carboxilação limitada pelo transporte de elétron (μmol CO₂ m⁻² folha s⁻¹);

τ – ponto de compensação da radiação fotossinteticamente ativa (μmol mol⁻¹);

C_c – concentração de CO₂ no sítio da Rubisco (μmol mol⁻¹).

Estas variáveis foram obtidas via um conjunto de equações apresentadas por Yin e van Laar (2005).

A respiração de manutenção (R_m) representa a quantidade de energia necessária para a manutenção dos processos fisiológicos da cultura. Para o cálculo da R_m foi utilizada a equação de McCree (1974) como função do peso seco acumulado da cultura (W_{acum}) bem como da variação de temperatura ($T_m - t_b$) (Eq. 2).

$$Rm = rm \times W_{-acum} \times Q_{10}^{\frac{(Tm-tb)}{10}} \quad (2)$$

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

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

Q_{10} – fator de incremento da manutenção.

O modelo calcula as taxas respiratórias de cada órgão da planta separadamente com coeficientes de manutenção diferentes, de acordo com Costa *et al.* (2009).

Para o estudo do desenvolvimento da cultura, foi utilizado o método do cálculo dos graus-dia, de acordo com a equação de Ometto, citada por Renato *et al.* (2013).

O índice de área foliar (IAF), que varia ao longo do estágio de desenvolvimento da planta, foi calculado de acordo com a Eq. 3.

$$IAF = AFE \times PF \quad (3)$$

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

PF – partição da matéria seca para as folhas (g m^{-2}).

Para simulações foram utilizados dados meteorológicos diários. As variáveis utilizadas foram temperatura do ar e $[\text{CO}_2]$. As primeiras simulações para calibração do modelo foram feitas com os dados de temperatura observados para a cidade de Viçosa, MG, Brasil ($20^\circ 45' 14''\text{S}$, $42^\circ 52' 55''\text{W}$) durante o período do ensaio.

Após os testes, foram feitas as simulações do desenvolvimento da cultura sob temperatura elevada. As simulações supracitadas foram feitas após o desenvolvimento de uma sub-rotina, que partiu dos dados de temperatura máxima e mínima observados durante o ensaio, sendo que em cada valor diário foram somados números aleatórios entre 0 e 2 °C (1ª. série), 0 e 4 °C (2ª. série), 0 e 6 °C (3ª. série) e 0 e 10°C (4ª. série). A geração aleatória ficou de maneira que os aumentos médios para as séries foram de 1, 2, 3 e 5 °C, respectivamente.

Foram, também, feitas simulações com variação de $[\text{CO}_2]$. O modelo foi testado mantendo-se as temperaturas observadas em Viçosa-MG durante o trabalho, testando-se as concentrações de CO_2 ambiente de 380 e 700 ppm. Por fim, foram feitas simulações com variações na temperatura do ar e $[\text{CO}_2]$ ambiente, simultaneamente.

Calibração do modelo

Para a calibração do modelo foram usados dados do trabalho citado anteriormente (Silva *et al.*, 2012). A AFE foi estimada, sendo equivalente ao quociente da área foliar total pela massa das folhas. Foram realizados testes para verificar se existiram variações ao longo do ciclo da cultura. O valor usado de 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 trabalho citado e houve uma variação entre 1,16 e $1,52 \text{ g m}^{-2}$ por folha. Por ser um parâmetro extremamente sensível, o modelo teve com entrada dados diários de nitrogênio na folha. Nos dias em que não ocorreram medições, o último valor medido foi usado no preenchimento da série.

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, $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, para realizar medições da taxa fotossintética.

A partir da regressão dos dados colhidos pelo IRGA, foi obtida uma relação entre a concentração de CO_2 no ambiente (Ca) e a concentração de CO_2 interna (Ci) no mesófilo. Assim, determinou-se o coeficiente para o cálculo da concentração de CO_2 no sítio de carboxilação da rubisco (Cc), que foi equivalente a 79% de Ca .

Durante o trabalho, foram feitas quatro medições das taxas fotossintéticas para serem comparadas com os valores simulados. O trabalho foi desenvolvido buscando condições ideais de crescimento do milho sem penalidades por falta de água ou algum nutriente, buscando observar a influência apenas da temperatura e do CO_2 . Assim o modelo foi construído 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 CO₂ atmosférico

Consideradas as temperaturas observadas durante o trabalho e variando-se as concentrações de CO₂ ambiente de 380 para 700 ppm, os valores das taxas fotossintéticas simuladas pelo modelo ficaram próximos das duas concentrações e na faixa dos valores medidos durante o ensaio, variando de 20 à 40 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Quadro 1).

Ursula *et al.* (2015) em experimento com milho em condições de [CO₂] elevados, não encontraram aumentos na fotossíntese, nem na biomassa no final do ciclo. Devido ao mecanismo de concentração de CO₂ existente nas plantas do tipo C₄, os valores atuais de [CO₂] na atmosfera, já são suficientes para a saturação da fotossíntese, não apresentando acréscimos na carboxilação com o aumento da concentração de CO₂ ambiente (Leakey *et al.*, 2006).

As plantas C₄ possuem um mecanismo diferenciado, pois apresentam a enzima fosfoenolpiruvato-carboxilase (PEPCase), responsável pela fixação primária de CO₂ nas folhas. A enzima Rubisco tem sempre à disposição CO₂ para a realização da carboxilação. O aumento de CO₂ no ambiente não interfere em grandes proporções na concentração de CO₂ interna disponível para a Rubisco. Em razão do exposto, não foi observado um aumento expressivo da taxa fotossintética nas simulações realizadas.

Na simulação 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. Observa-se que os resultados gerados pelo modelo foram próximos aos valores encontrados no ensaio, mostrando resposta satisfatória em relação à simulação do milho em condições de CO₂ elevado (Quadro 2).

Quadro 2 - Matéria seca total e matéria seca dos grãos durante o experimento realizado em Viçosa-MG e a simulação, com variações na concentração de CO₂ de 380 ppm e 700 ppm

	Experi- mento 380 ppm	Simu- lação 380 ppm	Experi- mento 700 ppm	Simu- lação 700 ppm
Matéria seca total (g m ⁻²)	2,712	2,608	2,666	2,737
Matéria seca de grãos (g m ⁻²)	1,132	1,208	1,137	1,268

Ao longo do ciclo da cultura do milho observou-se um pequeno aumento na matéria seca total com o aumento da concentração de CO₂ de 380 para 700 ppm (Figura 1). Isso ocorreu próximo ao estágio de panícula (cerca de 70 dias após o plantio), correspondendo a um incremento de aproximadamente 5% na matéria seca final. Em alguns estudos experimentais, observaram-se resultados semelhantes. Porter e Navas (2003) relatam que plantas com mecanismo fotossintético C₃ cultivadas em ambientes com altas concentrações de CO₂ apresentaram em média 48% de acréscimo na biomassa, enquanto que nas C₄ os valores ficaram em torno de 12%. De acordo com os autores, o aumento na biomassa das culturas C₄ com o aumento da concentração de CO₂ ambiental é um fenômeno intrigante, uma vez que as taxas fotossintéticas destas já se encontram saturadas na concentração atual de CO₂ (Sage, 2001).

Por outro lado por Leakey *et al.* (2004), em trabalhos com a cultura do milho não obtiveram resposta ao aumento da concentração de CO₂ (ensaio realizados com concentração de CO₂ variando de 354 a 549 ppm).

O pequeno aumento da matéria seca ao longo do ciclo do milho (Figura 1) pode ter algumas explicações. Em primeiro lugar, mesmo o milho sendo uma planta C₄, algumas variedades podem não estar completamente saturadas nas concentrações

Quadro 1 - Valores da taxa fotossíntese diária ($\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) simulados pelo modelo com a variação de CO₂ de 380 e 700 ppm

Tempo (dias)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
CO ₂ 380 ppm	30,8270	35,4132	29,6528	23,9076	18,2105	28,8806	23,7940	38,3001	39,3326	36,1424	26,5490	32,0600
CO ₂ 700 ppm	30,8280	35,4150	29,6540	23,9084	18,2110	28,8818	23,7946	38,3016	39,3341	36,1438	26,5499	32,0614

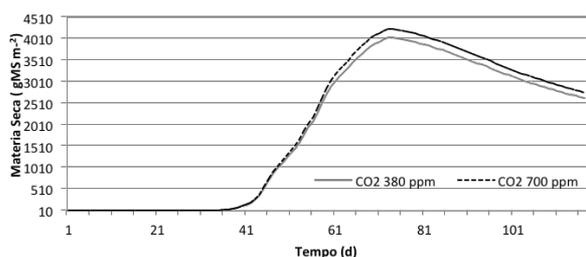


Figura 1 - Matéria seca total simulada pelo modelo para a cultura do milho ao longo dos dias, sob diferentes condições de CO₂ ambiente, 380 ppm e 700 ppm.

de CO₂ atuais. Em segundo lugar, o aumento da concentração de CO₂ pode induzir uma diminuição da condutância estomática, reduzindo consequentemente 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 C4 (Poorter e Navas, 2003).

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

Quando a simulação foi feita em condições de [CO₂] de 380 ppm e aumentado a temperatura média em 1 °C, observou-se que o valor da taxa fotossintética aumentou (Figura 2). 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 C4 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 Sage e Kubien (2007), plantas C4 requerem temperaturas maiores do que plantas C3. Em geral, as maiores taxas fotossintéticas em plantas C4 são obtidas em temperaturas entre 30 e 40 °C. Observa-se que o aumento da temperatura diária favorece diretamente a fotossíntese para a cultura do milho (Figura 2).

Para a fotossíntese bruta da cultura do milho, o aumento da temperatura é favorável. Porém esse aumento implica em outros fatores para a cultura, como, por exemplo, aumento nas taxas de respiração e diminuição do ciclo. O desenvolvimento

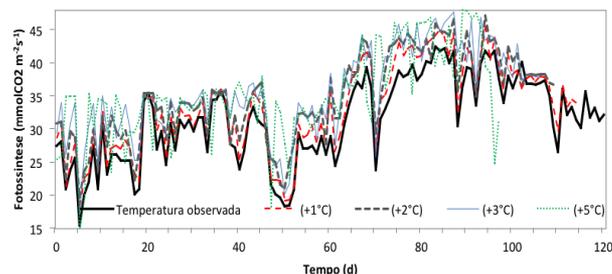


Figura 2 - Taxas fotossintéticas simuladas levando-se em conta as temperaturas observadas e simuladas em Viçosa-MG, no período de estudo.

vegetativo para simulações com a temperatura observada se estendeu até 120 dias; porém, com a temperatura acrescida de 5 °C o ciclo é reduzido para 97 dias. Quanto maior a temperatura mais rápido é o desenvolvimento, mesmo considerando-se a temperatura basal superior.

Observou-se aumento das taxas respiratórias à medida que se elevou a temperatura. No final da soma total, isto resultou num maior gasto energético que a planta tem com a respiração. À medida em que a temperatura se eleva, aumentaram-se também as taxas respiratórias; tal fato foi observado com o acréscimo de 3 e 5 °C na temperatura.

Em relação à matéria seca, os testes foram feitos nas mesmas condições anteriores de variação de temperatura. Na primeira etapa do processo, compreendendo os estádios vegetativos e de reprodução, ocorreu um maior ganho de matéria seca, com uma inclinação na linha de incremento de matéria seca total mais acentuada. Já na etapa final, compreendendo os estádios de enchimento e maturação dos grãos ocorreu uma diminuição da matéria seca total, uma vez que o modelo a considera como de senescência da planta (Figura 3).

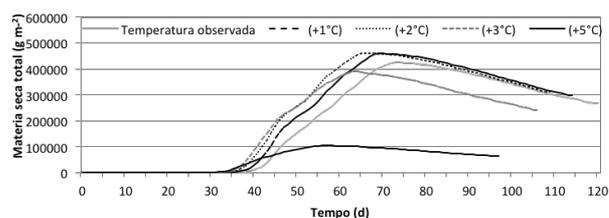


Figura 3 - Desenvolvimento dos grãos de milho simulados pelo modelo com a temperatura observada e com as temperaturas simuladas.

No início do ciclo, a energia disponível da fotossíntese foi utilizada para o crescimento vegetativo da planta; depois de certo tempo, teve início o desenvolvimento dos grãos que, por fim, completam o ciclo com sua maturação (Figura 4).

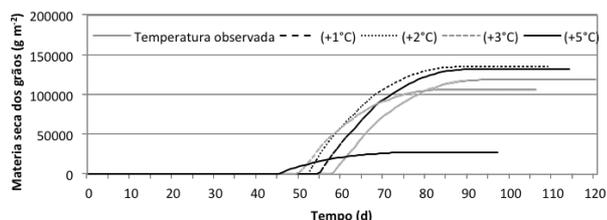


Figura 4 - Desenvolvimento dos grãos de milho simulados pelo modelo com a temperatura observada e com as temperaturas simuladas.

Na Figura 5 observou-se um incremento de aproximadamente 11% na produtividade do milho (matéria seca dos grãos) com o aumento de 1°C na temperatura média, quando a elevação foi 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 ensaio. Uma das justificativas do aumento de produtividade com um pequeno aumento na temperatura (1 e 2 °C) pode estar relacionado com o fato da cidade de Viçosa, MG, Brasil, ter uma temperatura média baixa (normal climatológica de 19,4 °C), quando comparada à Sete Lagoas, MG, Brasil, onde a cultivar foi desenvolvida (20,9 °C). Assim, com o aumento da temperatura 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.

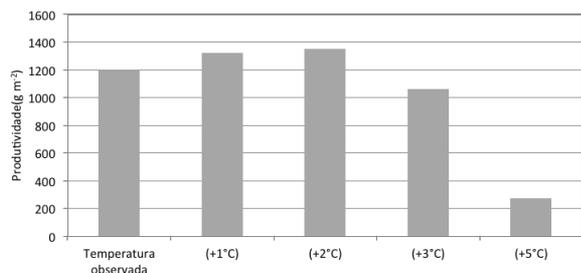


Figura 5 - Produtividade final gerada pelo modelo de simulação com a temperatura observada em Viçosa durante o experimento e com as temperaturas aumentadas.

Os resultados com incremento de matéria seca dos grãos encontrados aqui nas primeiras simulações com acréscimos de 1 e 2 °C (Figura 5), estão de acordo Pinto *et al.* (2004) num estudo feito sobre o aquecimento global e a agricultura, previa um aumento na produtividade potencial das plantas C4 como o milho e o sorgo, caso o aumento na concentração de CO₂ viesse associado à elevação da temperatura ambiente.

Quando a simulação foi feita com acréscimo de 3°C, observou-se uma queda de 11% na matéria seca dos grãos (Figura 5). Observa-se que com o aumento de 5 °C essa queda é agravada em 75% da matéria seca dos grãos. Siqueira *et al.* (2001) em suas simulações em condições de aumento de temperatura, projetaram para a cultura do milho reduções na produtividade entre 14 a 33%, com encurtamento de ciclos entre 21% a 33% devido, principalmente, ao aumento de temperatura e também à redução da precipitação. Streck e Alberto (2006) também observaram em simulações, uma redução no rendimento do milho quando se consideraram incrementos na temperatura. Já Campos *et al.* (2010) observaram com o plantio do milho safrinha em 5 regiões diferentes do estado de Goiás, Brasil, uma grande diferença na produtividade obtida. Esse resultado foi associado às diferentes condições climáticas de cada região do estado. Silva *et al.* (2016) estudaram a influencia das condições microclimáticas no crescimento do milho.

A resposta do milho ao incremento simultâneo de [CO₂] e temperatura

Observou-se que um pequeno aumento na temperatura é favorável para a cultura do milho, uma vez que plantas C4 são favorecidas com esse incremento (Figura 5). Tal ganho tem um limite aparente: acima de 2 °C esse aumento não é mais favorável. Já com o incremento da concentração de CO₂ atmosférico para a cultura C4 em questão, não se notaram grandes vantagens, embora limitações também não tenham sido observadas. Assim, os resultados com o incremento simultâneo de [CO₂] e temperatura ficaram próximos dos resultados obtidos quando apenas o aumento da temperatura foi simulado.

Os resultados encontrados podem ser atribuídos ao fato de que a enzima PEPCase em plantas

Quadro 3 - Matéria seca (g m⁻²) dos grãos do milho simulados pelo modelo em diferentes condições

Simulação	[CO ₂]					
	380 ppm	700 ppm				
			Temp. + 1°C	Temp. + 2°C	Temp. + 3°C	Temp. + 5°C
Matéria seca	1194	1253	1388	1418	1059	492

C4 concentra CO₂ que é utilizado pela enzima Rubisco na carboxilação da ribulose 1,5-bisfosfato, suprimindo a fotorrespiração mesmo com o incremento moderado de temperatura. Assim, o aumento da [CO₂] no ambiente não implica em um aumento nas taxas fotossintéticas. Já o aumento na temperatura representou, um ganho nas taxas fotossintéticas.

Dessa maneira, com o acréscimo simultâneo da concentração de CO₂ e da temperatura, observou-se que o favorecimento no desenvolvimento do milho é semelhante nos casos do aumento somente dessa última variável. Ressalta-se que o CO₂ elevado, apesar de não favorecer, também não influencia negativamente no desenvolvimento da planta do milho (Quadro 3).

Os resultados aqui obtidos são similares aos reportados por Streck e Alberto (2006), que simularam aumentos simultâneos na concentração de CO₂ e na temperatura ambiente, estudando a cultura do milho. Cai *et al.* (2016) em trabalho com o trigo (planta C3) observaram uma redução na produtividade quando se consideraram incrementos na temperatura e CO₂ simultaneamente. 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 CO₂ na produtividade. Já com elevações de 4 °C, houve redução na produtividade simulada.

CONCLUSÕES

1 – O modelo testado é uma ferramenta válida para explicar os processos de desenvolvimento da cultura do milho, simulando as respostas da cultura quanto ao aumento de temperatura, de CO₂ e das duas variáveis simultaneamente.

2 – Com aumento da [CO₂] no modelo, não se verificou nem ganho e nem desfavorecimento consideráveis nas taxas fotossintéticas e na produtividade.

3 – O aumento de temperatura foi favorável 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 a redução do ciclo da cultura.

4 – Simulações com aumento simultâneo de temperatura e CO₂ não resultaram em respostas positivas, com temperatura acima de 3°C.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bezerra, A.H.F. & Levien, S.L.A. (2014) – Simulação de um ciclo da cultura da melancia utilizando o software swet. *Revista Caatinga*, vol. 27, n. 1, p. 9-16.
- Cai, C.; Yin, X.; He, S.; Jiang, W.; Si, C.; Struik, P.C.; Luo, W.; Li, G.; Xie, Y. & Xiong, Y. (2016) – Responses of wheat and rice to factorial combinations of ambient and elevated CO₂ and temperature in FACE experiments. *Global Change Biology*, vol. 22, n. 2, p. 856-874. <http://doi.org/10.1111/gcb.13065>
- Campos, M.C.C.; Silva, V.A.; Cavalcante, I.H.L. & Beckmann, M.Z. (2010) – Produtividade e características agrônômicas de cultivares de milho safrinha sob plantio direto no Estado de Goiás. *Revista Acadêmica Ciência Animal*, vol. 8, n. 1, p. 77-84. <http://doi.org/10.7213/cienciaanimal.v8i1.10544>
- Costa, L.C.; Justino, F.B.; Oliveira, L.J.C.; Sediya, G.C.; Ferreira, W.P.M. & Lemos, C.F. (2009) – Potential forcing of CO₂, technology and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) yield in southeast Brazil. *Environmental Research Letters*, vol. 4, n. 1, p. 1-10. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/4/1/014013>

- Detomini, E.R.; Dourado Neto, D.; Frizzzone, J.A.; Doherty, A.; Meinke, H.; Reichardt, K.; Dias, C.T.S. & Figueiredo, M.G. (2012) – Stochastic model for simulating maize yield. *Transactions of the ASABE*, vol. 55, n. 3, p. 1107-1120.
- Ergamaschi, H.; Costa, S.M.S.; Wheeler, T.R. & Challinor, A.J. (2013) – Simulating maize yield in subtropical conditions of southern Brazil using Glam model. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 48, n. 2, p. 132-140. <http://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000200002>
- Leakey, A.D.; Uribeharrea, M.; Ainsworth, E.A.; Naidu, S.L.; Rogers, A.; Ort, D.R. & Long, S.P. (2006) – Photosynthesis, productivity, and yield of maize are not affected by open-air elevation of CO₂ concentration in the absence of drought. *Plant Physiology*, vol. 140, n. 2, p. 779-790. <http://doi.org/10.1104/pp.105.073957>
- Leakey, P.A.D.B.; Bernacchi, C.J.; Dohleman, F.G.; Ort, D.R. & Long, S.P. (2004) – Will photosynthesis of maize (*Zea mays*) in the US Corn Belt increase in future [CO₂] rich atmospheres? An analyses of diurnal courses of CO₂ uptake under free-air concentration enrichment (FACE). *Global Change Biology*, vol. 10, n. 6, p. 951-962. <http://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00767.x>
- Marin, F.R.; Jones, J.W.; Singels, A.; Royce, F.; Assad, E.D.; Pellegrino, G.Q. & Justino, F.B. (2013) - Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. *Climatic Change*, vol. 117, n. 1-2, p.227-239. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0561-y>
- McCree, K.J. (1974) – Equations for the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum, as function of dry weight, photosynthesis rate and temperature. *Crop Science*, vol. 14, n. 4, p. 509-514. <http://doi.org/10.2135/cropsci1974.0011183X001400040005x>
- Pinto, H.S.; Assad, E.D. & Zullo Júnior, J. (2004) – O aquecimento global e a agricultura. *Saneas*, vol. 18, p. 34-37.
- Poorter H. & Navas, M.L. (2003) – Plant growth and competition at elevated CO₂: winners, losers and functional groups. *New Phytologist*, vol. 157, n. 2, p. 175-198. <http://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00680.x>
- Renato, N.S.; Silva, J.B.L.; Sediyaama, G.C. & Pereira, E.G. (2013) – Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão. *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 28, n. 4, p. 382-388. <http://doi.org/10.1590/S0102-77862013000400004>
- Sage, R.F. (2001) – Environmental and evolutionary preconditions for the origin and diversification of the C₄ photosynthetic syndrome. *Plant Biology*, vol. 3, n. 3, p. 202-213. <http://doi.org/10.1055/s-2001-15206>
- Sage, R.F. & Kubien, D.S. (2007) – The temperature response of C₃ and C₄ photosynthesis. *Plant, Cell & Environment*, vol. 30, n. 9, p. 1086-1106. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01682.x>
- Silva, J.B.L.; Ferreira, P.A.; Pereira, E.G.; Costa, L.C. & Miranda, G.V. (2012) – Development of experimental structure and influence of high CO₂ concentration in maize crop. *Engenharia Agrícola*, vol. 32, n. 2, p. 306-314. <http://doi.org/10.1590/S0100-69162012000200010>
- Silva, M.A.V.; Ferreira, W.M.P.; Andrade, V.M.S. & Costa, J.M.N. (2016) – Influência das condições microclimáticas no crescimento do milho BR 106, cultivado sob sementeira direta. *Revista de Ciências Agrárias*, vol. 39, n. 3, p. 383-394. <http://doi.org/10.19084/RCA15117>
- Siqueira, O.J.W.; Steinmetz, S. & Salles, L.A.B. (2001) – Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: Lima, M.A.; Cabral, O.M.R. & Miguez, J.D.G. (Eds.) – *Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira*. Jaguariúna, Embrapa Meio Ambiente. p. 33-64.
- Streck, N.A. & Alberto, C.M. (2006) – Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 41, n. 9, p. 1351-1359. <http://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000900002>
- Yin, X. & Schapendonk, A.H.C.M. (2004) – Simulating the partitioning of biomass and nitrogen between root and shoot in crop and grass plants. *NJAS – Journal of Life Sciences*, vol. 51, n. 4, p. 407-426. [http://doi.org/10.1016/S1573-5214\(04\)80005-8](http://doi.org/10.1016/S1573-5214(04)80005-8)
- Yin, X. & van Laar, H.H. (2015) – *Crop Systems Dynamics an ecophysiological simulation model for genotype-by-environment interactions*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers. 153 p.