



Implementação e teste de um modelo mecanístico de simulação do crescimento e desenvolvimento de plantas de milho

Dolores Wolschick², Mauro A. Martinez³, Paulo C. R. Fontes⁴ & Antônio T. de Matos³

RESUMO

uso eficiente e sustentável da água, dos nutrientes e dos agrotóxicos no sistema produtivo. Assim, objetivou-se, com este trabalho, implementar um modelo mecanístico de simulação do crescimento e desenvolvimento para a cultura do milho (*Zea mays* L.) e testá-lo utilizando-se dados experimentais obtidos em lisímetros. O modelo foi testado com dados obtidos em experimento realizado na área experimental do Departamento de Engenharia Agrícola/UFV. O híbrido de milho Agromen 2012 foi semeado em lisímetros de drenagem e conduzido para atingir a produção potencial, realizando-se determinações de área e senescência foliar, além de matéria seca dos órgãos da planta. O modelo, quando considerou a senescência das folhas, estimou adequadamente os valores de índice de área foliar durante todo o ciclo da cultura e o acúmulo de matéria seca nas folhas, caule e raízes, durante o estágio vegetativo; apesar de não estimar bem a variação no acúmulo de matéria seca nos grãos, o valor estimado de matéria seca final nos grãos foi apenas 9,8% superior ao observado experimentalmente.

Palavras-chave: fotossíntese, carboidrato, matéria seca, *Zea mays* L.

Implementation and test of a mechanistic model for simulating the growth and development of corn plant

ABSTRACT

Modeling the plant-soil-atmosphere system serves as a support for field research as well as for efficient and sustainable use of water, nutrients and pesticides in the productive system. This study aimed to implement a mechanistic model for simulating the growth and development of corn (*Zea mays* L.) and to test it by using data from a lysimeter experiment. The model was tested by using the data obtained from an experiment carried out in the experimental area belonging to the Agricultural Engineering Department/UFV. The Agromen 2012 hybrid maize was sown in drainage lysimeters and the crop conducted to reach its potential yield. Determinations of the leaf area, leaf senescence and the dry matter of the organs of the plant were accomplished during the development cycle. When the senescence of the leaves was considered, the model estimated the values of area index appropriately during the whole cycle of the crop, and estimated the dry matter accumulation in the leaves, stem and roots during the vegetative stage. In spite of not estimating well the variation in the dry matter accumulation in the grains, the final estimated value of grain dry matter was only 9.8% higher than the observed.

Key words: photosynthesis, carbohydrate, dry matter, *Zea mays* L.

¹ Extraído da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada à UFV

² São Luiz Gonzaga, CEP: 79011-280 Campo Grande, MS. Fone: (67) 352-4494. E-mail: doloreswolschick@hotmail.com

³ DEAg/UFV, Av. P. H. Rolfs, s/n, CEP: 36570-000, Viçosa, MG. Fone: (31) 3899-1910. E-mail: mmauro@ufv.br

⁴ DFT/UFV. Fone (31) 3899-1140. E-mail: pacerefo@ufv.br

INTRODUÇÃO

As plantas apresentam órgãos especializados (raízes e órgãos aéreos) para explorar as condições ambientais. Os órgãos aéreos utilizam a energia solar para realização da fotossíntese e produção de metabólitos, enquanto as raízes ancoram as plantas no solo e absorvem água e nutrientes minerais da solução do solo que, juntamente com os metabólitos, serão utilizados para o desenvolvimento e o crescimento das plantas.

Os fatores de produção que se encontram acima da superfície do solo, como luz, temperatura e dióxido de carbono não são controláveis sob condições de campo, enquanto os fatores que se encontram abaixo da superfície do solo, como água e nutrientes, podem ser alterados por meio de irrigações e adubações. Nos modelos de produção potencial da cultura considera-se que a planta cresce sob nenhuma restrição hídrica ou nutricional e que os fatores de produção aéreos definem o crescimento e a produção das plantas.

O acúmulo de matéria seca na planta depende do balanço entre os processos de fotossíntese e respiração (Taiz & Zeiger, 1991). A respiração pode ser dividida, teoricamente, em respiração de crescimento e de manutenção. A respiração relacionada ao crescimento corresponde à quantidade de carboidratos necessária para suprir energia às reações de síntese de nova fitomassa, enquanto a respiração de manutenção corresponde à quantidade de carboidratos necessária para suprir energia aos processos biológicos e bioquímicos da planta sem haver, no entanto, crescimento. Em termos de modelagem, o crescimento dos órgãos ocorre por meio de um percentual de matéria seca direcionada a cada órgão. Através das mudanças de prioridade no abastecimento é possível manter suprida uma zona em franco crescimento e, ao mesmo tempo, evitar que um tecido ou órgão com pouca atividade seja superabastecido (Larcher, 2000).

A ação de modelar o funcionamento de uma cultura significa realizar uma síntese dos mecanismos de crescimento e desenvolvimento, representando-os por meio de funções matemáticas (Medeiros et al., 2000). Os vários modelos desenvolvidos para simular o crescimento e o desenvolvimento da cultura do milho (Lima, 1995; Barros, 1998; Costa & Barros, 2001), quando testados sob diferentes condições ambientais, tem mostrado que o índice de área foliar e a distribuição e distribuição de matéria seca entre os diversos órgãos da planta são as variáveis que ainda apresentam um baixo ajuste aos dados observados.

Os resultados de simulações de movimento de água e solutos no solo sem se considerar a presença de planta (Costa et al., 1999; Oliveira et al., 2000; Corrêa, 2001) diferem dos resultados obtidos quando se consideram a extração de água e de nutrientes do solo pela planta. A inclusão de técnicas de simulação do crescimento e desenvolvimento da planta aos modelos de transporte de água e solutos no solo está aumentando, dando suporte a pesquisas de campo e ao planejamento do uso eficiente e sustentável da água, dos nutrientes e dos pesticidas no sistema produtivo; assim, o bom desempenho dos modelos de transporte de água e solutos passa a depender, também, da eficiência na simula-

ção dos processos de crescimento e desenvolvimento da planta; portanto, o objetivo deste trabalho foi implementar um modelo mecanístico de simulação do crescimento e desenvolvimento para a cultura do milho (*Zea mays* L.) e testá-lo, comparando-se os resultados simulados com aqueles obtidos experimentalmente, visando à sua inclusão no modelo SIMASS-C de transporte de água e solutos no solo (Corrêa, 2001).

MATERIAL E MÉTODOS

O modelo de crescimento e desenvolvimento de plantas de milho é estruturado em três compartimentos principais, sendo que no primeiro compartimento se calcula a taxa de assimilação diária de CO₂ por meio da fotossíntese do dossel da cultura, enquanto no segundo, o carbono assimilado é convertido em glicose (carboidrato) e descontada a quantidade de glicose necessária para suprir a demanda da respiração de manutenção; enfim, no último compartimento o restante da glicose é translocado para os diferentes órgãos da planta, de acordo com a demanda de cada órgão, em função da taxa de desenvolvimento da cultura, sendo então calculado o incremento diário de matéria seca com base nos coeficientes de conversão de cada órgão da planta.

A assimilação bruta diária de CO₂ pelo dossel das plantas é calculada da seguinte forma (France & Thornley, 1984; Thornley & Johnson, 2000):

$$P_d = \frac{P_m h}{k} \ln \left[\frac{(\Omega + \beta + (2\Omega\beta + \beta^2)^{1/2})}{(\Omega \exp^{-kIAF} + \beta + (2\Omega\beta \exp^{-kIAF} + \beta^2)^{1/2})} \right]$$

em que P_d é a fotossíntese bruta diária (kg m⁻² d⁻¹ de CO₂); $\Omega = \alpha k RFA/D_d$; $\beta = (1 - \tau)P_m$; τ é o coeficiente de transmissividade da radiação no dossel; $P_m = P_{m20}\Psi$; P_m = fotossíntese bruta máxima (kg m⁻² s⁻¹ de CO₂); $\Psi = (t_{med} - t_b)/(t_r - t_b)$; P_{m20} é a fotossíntese máxima a 20 °C (kg m⁻² s⁻¹ de CO₂); t_r é a temperatura de referência fixada a 10 °C; t_b é a temperatura basal da cultura (°C); t_{med} é a temperatura média do ar (°C); D_d é a duração do dia (s); RFA é a radiação fotossinteticamente ativa (J m⁻² d⁻¹); k é o coeficiente de extinção da radiação no dossel (adimensional); α é a eficiência fotossintética inicial da cultura (kg J⁻¹ de CO₂); IAF é o índice de área foliar (adimensional) e h = horas de brilho solar.

Para os parâmetros de fotossíntese máxima (P_{m20}) e eficiência fotossintética inicial da cultura do milho (α) utilizaram-se os valores sugeridos por de Vries et al. (1989) e Barros (1998): 1,4e⁻⁶ kg m⁻² s⁻¹ de CO₂ e 1,9e⁻⁸ kg J⁻¹ de CO₂, respectivamente. Os valores dos parâmetros coeficiente de extinção de luz (k) e coeficiente de transmissividade (t), para a cultura do milho, foram considerados iguais a 0,65 e 0,10, respectivamente (Barros, 1998).

A transformação do CO₂ assimilado diariamente em carboidrato (glicose) foi realizada utilizando-se a equação:

$$A_g = P_d \frac{30}{44} \quad (2)$$

em que A_g é a taxa de assimilação de glicose ($\text{kg m}^{-2} \text{d}^{-1}$ de CH_2O).

O carboidrato produzido diariamente foi utilizado, prioritariamente, para suprir a demanda da respiração de manutenção que foi calculada multiplicando-se a matéria seca diária total acumulada individualmente em cada órgão da planta pelo coeficiente de respiração de manutenção, corrigido para a temperatura média diária do ar, o qual é estimado por (de Vries et al., 1989):

$$R_{\text{mtmed}} = R_{\text{mtr}} * Q_{10}^{(t_{\text{med}} - t_r)/10} \quad (3)$$

em que R_{mtmed} é o coeficiente de respiração de manutenção corrigido; R_{mtr} é o coeficiente de respiração de manutenção a temperatura de referência; Q_{10} é o coeficiente de temperatura; t_r é a temperatura de referência, fixada a 25°C ; t_{med} é a temperatura média diária do ar ($^\circ\text{C}$);

Os valores dos coeficientes de respiração de manutenção a temperatura de referência (R_{m25}), expressos em massa de CH_2O por massa de matéria seca, usados no modelo, foram: 0,015 para caule, 0,01 para raiz, grãos e sabugo e 0,03 $\text{kg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ para folhas e palha (Bonato et al., 1999; Arora & Gajri, 2000).

O carboidrato líquido foi fracionado entre os órgãos da planta, em função da taxa de desenvolvimento da cultura. Adotou-se, nas simulações, o fracionamento de carboidrato para os diferentes órgãos da planta observado experimentalmente (Wolschick, 2004).

O acúmulo de matéria seca de determinado órgão da planta ao longo do tempo foi estimado por (de Vries et al., 1989):

$$\frac{d\text{MS}}{dt} = (P_d - R_{\text{mtmed}} \text{MS})Eg \quad (4)$$

em que $d\text{MS}/dt$ é a variação de matéria seca ($\text{kg m}^{-2} \text{d}^{-1}$) e Eg é a eficiência de conversão de carboidrato em matéria seca (kg kg^{-1}).

Os valores de eficiência de conversão de carboidrato em matéria seca, utilizados no modelo para as simulações, foram: 0,72, 0,69, 0,72 e 0,73 kg MS kg^{-1} de CH_2O para folha, caule, raiz e órgãos de reprodução, respectivamente (Arora & Gajri, 2000).

No modelo, o estágio de desenvolvimento da planta foi simulado considerando-se uma escala variando de 0 a 2, em que 0 representa a emergência das plantas, 1 o florescimento e 2 a maturação fisiológica, o qual é definido por:

$$T_d = \frac{GD_n}{GDF} \quad \text{para } 0 \leq T_d \leq 1 \quad (5)$$

ou

$$T_d = \frac{GD_n - GDF}{GDT - GDF} \quad \text{para } 0 < T_d \leq 2 \quad (6)$$

em que T_d caracteriza o estágio de desenvolvimento, GD_n são os graus-dias acumulados até o n -ésimo dia após a emergência, GDF e GDT são os graus-dias necessários para a planta atingir, respectivamente, o florescimento e a maturação fisiológica.

O GD_n é calculado-se usando a equação (Villa Nova et al., 1972):

$$GD_n = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{t_{\text{max}_i} + t_{\text{min}_i}}{2} \right) - t_b \right] \quad (7)$$

em que t_{max_i} é a temperatura máxima do ar no i -ésimo dia após a emergência ($^\circ\text{C}$); t_{min_i} é a temperatura mínima do ar no i -ésimo dia após a emergência ($^\circ\text{C}$) e t_b é a temperatura basal da cultura ($^\circ\text{C}$).

Obteve-se o índice de área foliar pela multiplicação da matéria seca acumulada nas folhas pela área foliar específica (AFE). No modelo se utilizou o valor médio de AFE ($18 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) obtido experimentalmente (Wolschick, 2004).

Realizaram-se as simulações do processo de crescimento considerando-se a ocorrência ou não da senescência de folhas, caule e raízes. As perdas devidas à senescência, estimadas a partir dos dados experimentais e tendo por base valores citados na literatura (de Vries et al., 1989; Costa & Barros, 2001), foram de 0,01 kg m^{-2} de CH_2O para folha e caule, a partir de T_d igual a 1,62 (estádio de grão dentado), e de 0,0000001 kg m^{-2} de CH_2O para as raízes, a partir de T_d igual a 1,54 (estádio de grão farináceo). Na simulação do acúmulo de matéria seca nos grãos considerou-se que a matéria seca perdida pelas folhas, caule e raízes, devido à senescência, foi translocada para os grãos.

O programa computacional do modelo de crescimento e desenvolvimento de planta de milho foi estruturado de tal forma que permite, ao usuário, alterar os valores dos parâmetros necessários para calcular a fotossíntese diária do dossel. Os valores dos coeficientes de respiração de manutenção e eficiência de conversão, para os diferentes órgãos da planta de milho, e os valores dos graus dia, necessários para a planta atingir o estágio de florescimento e maturação fisiológica, também podem ser alterados. Desta forma, o usuário também pode alterar esses parâmetros, em função das condições ambientais do local para o qual deseja fazer as simulações.

Experimento em lisímetros de drenagem

Para testar o modelo conduziu-se um experimento em um conjunto de 20 lisímetros de drenagem localizados na Área Experimental de Hidráulica e Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Esses lisímetros consistiram de caixas d'água de amianto com as seguintes dimensões: 1,10 m de largura, 1,60 m de comprimento e 0,6 m de profundidade e seu preenchimento foi realizado utilizando-se material de solo retirado do horizonte B de um Latossolo Vermelho-Amarelo álico (LVa) localizado próximo à área experimental (Figueiredo, 2002). Amostras de solo dos lisímetros foram submetidas a análises químicas no Laboratório de Análise de Solos da Universidade Federal de Viçosa. A partir dos resultados das análises, procedeu-se à adubação do solo, conforme recomendações para a cultura do milho, para o Estado de Minas Gerais (CFSEMG, 1999), objetivando-se a produção potencial da cultura. As quantidades de fósforo (70 kg ha^{-1} de P_2O_5) e potássio (60 kg ha^{-1} de K_2O) foram aplicadas no momento da semeadura, enquanto o nitrogênio foi parcelado em duas vezes, sendo aplicados 20 kg ha^{-1} na

semeadura e 140 kg ha⁻¹ em cobertura, quando as plantas apresentavam 8 folhas expandidas.

Realizou-se a semeadura do milho Agromen 2012 (híbrido duplo super precoce), dentro e fora dos lisímetros, no dia 04/10/2002, de forma manual, em linhas espaçadas um metro, proporcionando população aproximada de 60.000 plantas ha⁻¹. A emergência das plantas ocorreu no dia 12/10/2002.

Quando as plantas apresentavam duas folhas expandidas, oito plantas em quatro lisímetros foram selecionadas para determinação não destrutiva de área foliar, senescência de folhas e emergência de folhas. Essas plantas foram monitoradas duas a três vezes por semana, durante o ciclo de desenvolvimento da cultura.

Da emergência das folhas, no cartucho, até o aparecimento da bainha, mediu-se o seu comprimento e largura máxima. A área foliar da planta foi determinada fazendo-se o produto do fator 0,75 (Stickler et al., 1961) pelo somatório do produto do comprimento pela largura de cada folha. Realizaram-se as observações de senescência foliar visualmente, em cada folha, estabelecendo-se uma escala de 0 a 100% que corresponde a folhas totalmente verdes e totalmente senescentes, respectivamente. Descontando-se a porcentagem senescida das folhas, obteve-se a área foliar ativa da planta. O índice de área foliar foi determinado pela razão entre a área foliar ativa da planta e a área superficial de solo ocupada pela mesma.

Durante a condução do experimento, em intervalos de uma semana duas plantas eram colhidas de lisímetros sorteados aleatoriamente, para obtenção da massa de matéria seca. As plantas eram cortadas rente ao solo, separadas em diferentes órgãos (colmos, folhas, pendão, sabugo, palha da espiga e grãos), acondicionados em estufa de ventilação forçada a 65 °C, até atingirem massas constantes.

A coleta das raízes foi realizada através de retiradas de monólitos com dimensões de 0,17 m de comprimento, que correspondia à distância entre plantas na linha, 0,10 cm de largura, transversalmente à linha de plantio, e 0,10 m de profundidade. As coletas foram realizadas em todo o volume de solo ocupado pela planta até 0,40 m de profundidade e as raízes foram separadas do solo e de outros resíduos por lavagem cuidadosa sob água corrente, em peneira com abertura de 1 mm; após a limpeza, as raízes foram colocadas em estufa, até massa constante.

Mediram-se, no local do experimento, as temperaturas máxima e mínima diárias, a precipitação pluvial diária e a evaporação no tanque Classe "A". Os demais dados climáticos necessários à utilização do modelo foram obtidos na Estação Climatológica do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV.

A evapotranspiração da cultura foi estimada fazendo-se o produto da evaporação medida no tanque Classe "A" pelos coeficientes do tanque e de cultura sugeridos por Doorenbos & Kassan (1979). Considerando-se a capacidade de retenção de água no solo, quando a diferença acumulada entre a evapotranspiração e a precipitação atingia 25 mm aplicava-se uma lâmina de água de magnitude igual àquela diferença.

Para testar o modelo ajustou-se uma equação de regressão linear entre os dados estimados (x) e observados (y) ob-

tendo-se, assim, os coeficientes da equação linear e o coeficiente de determinação (R²); além disso, calculou-se também a raiz quadrada do desvio médio (RMSD) a qual fornece uma idéia dos desvios em relação à linha 1:1 (Probert et al., 1998; Kobayashi & Salam, 2000) e o erro percentual médio (e_m) que informa, em média, quanto o valor observado se afasta do valor estimado em porcentagem. Essas duas estatísticas foram calculadas, respectivamente, da seguinte forma:

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (8)$$

e

$$e_m = \left(\frac{1}{n} \right) \left[\sum_{i=1}^n \frac{|y_i - x_i|}{y_i} \right] * 100 \quad (9)$$

em que n é o número de observações; x_i é o valor estimado da variável de interesse na n-ésima observação e y_i é o valor observado da variável de interesse na n-ésima observação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta os valores de índice de área foliar (IAF) observados experimentalmente e estimados pelo modelo de crescimento e desenvolvimento de plantas de milho. Inicialmente, simulou-se o IAF sem se considerar a senescência das folhas, verificando-se seu aumento, mesmo após a planta atingir o estágio de pendramento, não correspondendo ao comportamento das plantas de milho (Figura 1). Para melhorar o desempenho do modelo na simulação do IAF, ajustou-se uma taxa de senescência foliar diretamente no cálculo do IAF. Quando se considerou a senescência, a diferença entre os valores de IAF estimados e observados no final do ciclo da cultura, que era de 50%, reduziu para 10% (Figura 1). O bom desempenho do modelo em estimar os valores de índice de área foliar, após a inclusão da senescência, é confirmado pelos resultados estatísticos (Tabela 1). Os valores dos coeficientes

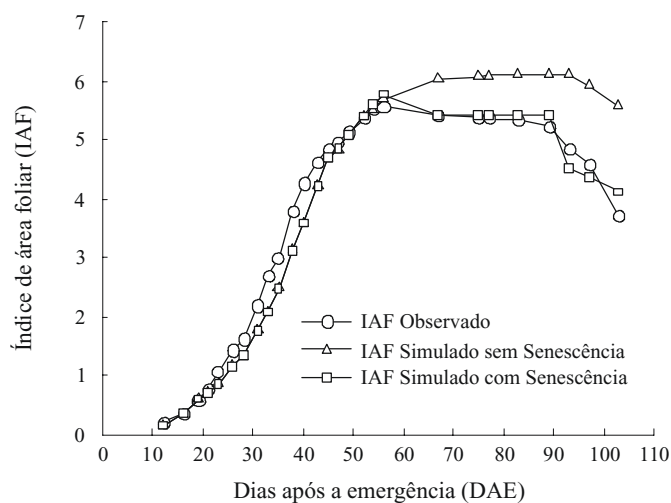


Figura 1. Índices de área foliar observados e estimados pelo modelo considerando-se ou não a senescência foliar

linear e de declividade da equação obtida com a regressão linear se aproximaram de 0 e 1, respectivamente, demonstrando que a linha ajustada está próxima da linha 1:1. Os valores do coeficiente de determinação e da raiz quadrada do desvio médio (RMSD) demonstram boa associação entre os dados estimados e os observados. Quando o valor de RMSD é igual a zero, indica que houve ajuste perfeito entre os valores estimados e observados. Ma et al. (2003), testando a habilidade do modelo RZWQM (Root Zone Water Quality Model) em estimar o índice de área foliar de plantas de milho, consideraram satisfatórias as estimativas feitas pelo modelo, quando os valores de RMSD estiveram dentro do intervalo de 0,22 a 0,33 m² m⁻².

Tabela 1. Parâmetros estatísticos usados na comparação dos valores experimentais aos valores estimados pelo modelo de crescimento e desenvolvimento de planta de milho

Variável	a	b	R ²	RMSD	e _m
IAF (sem senescência)	0,06	0,937	0,96	0,66	13,85
IAF (com senescência)	0,03	1,039	0,99	0,31	8,61
Folha	-7,21	1,113	0,99	43,69	11,57
Caulo	-8,80	1,028	0,98	66,83	9,97
Pendão	21,13	0,323	0,22	10,21	32,34
Sabugo	16,67	1,137	0,83	52,44	26,44
Palha da Espiga	58,68	0,700	0,32	59,99	26,92
Grão	-87,62	1,208	0,90	199,11	51,11
Raiz	-1,92	0,996	0,93	20,38	31,40
MS da parte aérea	-12,08	1,062	0,98	274,99	51,37
MS da planta inteira	-14,06	1,060	0,98	287,19	39,23

a – coeficiente linear; b – coeficiente de declividade; R² – coeficiente de determinação; RMSD – raiz quadrada do desvio médio; e_m – erro percentual médio

Comparando-se os resultados do IAF simulados neste trabalho com aqueles apresentados por Costa & Barros (2001), verifica-se que, apesar das diferenças nas condições climáticas experimentais e dos híbridos serem diferentes, os modelos se comportaram de maneira semelhante, com pequena melhoria nos resultados simulados neste trabalho, principalmente quando se considerou a senescência foliar. A diferença entre os resultados simulados pelos dois modelos pode ser devida a valores de parâmetros, relacionados à planta e às condições climáticas, comuns aos modelos.

Quanto mais eficiente for o modelo em estimar os valores de índice de área foliar ao longo do tempo, mais realista será a simulação da assimilação de CO₂, melhorando o desempenho do modelo em estimar o acúmulo de matéria seca na planta.

Na Figura 2 estão apresentados os valores observados e estimados de matéria seca de folhas, caule e raízes, em função dos dias após a emergência.

Do início do crescimento até os 38 dias após a emergência (DAE) notou-se bom ajuste entre os valores observados e os estimados de matéria seca de folhas; a partir daí, o modelo subestimou os valores observados até os 55 DAE, não sendo capaz de acompanhar o rápido crescimento foliar ocorrido no campo; posteriormente, nas coletas realizadas aos 59 e 67 DAE, ocorreu uma pequena superestimativa dos valores simulados em relação aos observados. Nas coletas seguin-

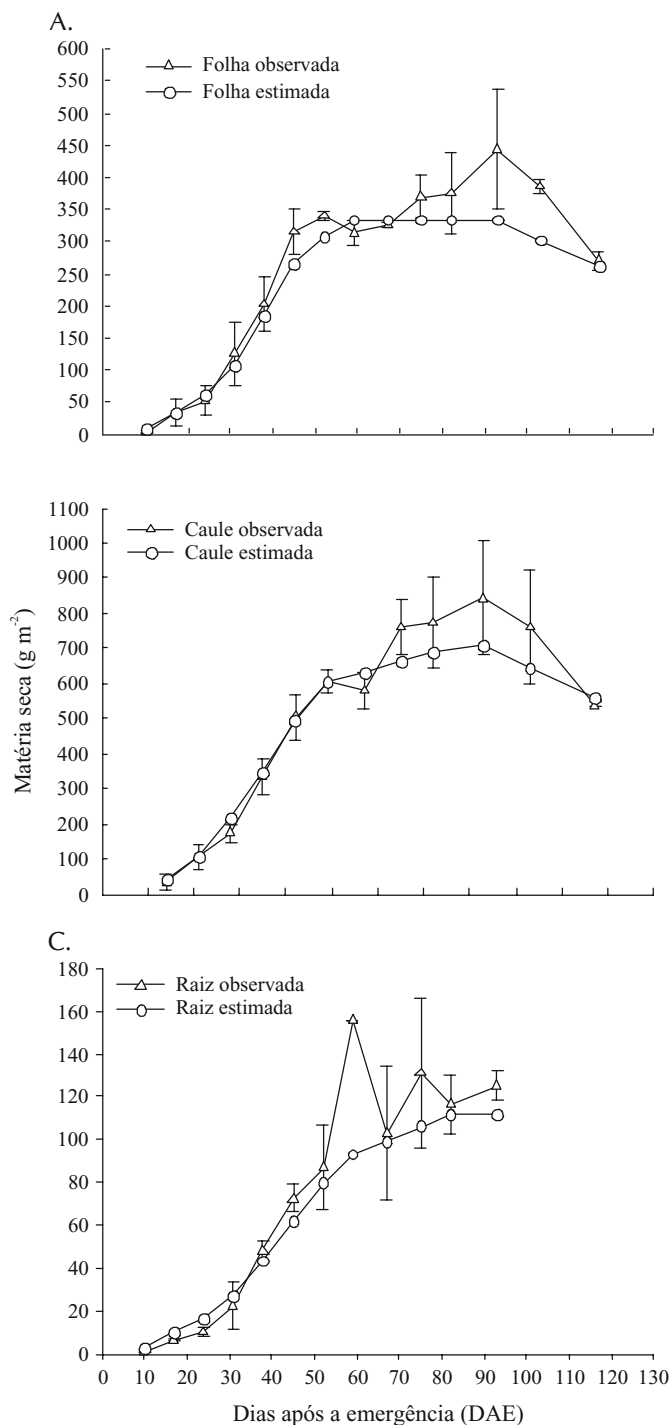


Figura 2. Valores acumulados de matéria seca de folhas (A), caule (B) e raízes (C) observados e estimados pelo modelo, ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura

tes até o final do ciclo da cultura o modelo voltou a subestimar os valores observados.

Nota-se, portanto, que o modelo simulou bem (RMSD = 22,96 g m⁻² e e_m = 9,46) o acúmulo de matéria seca nas folhas até o 67 DAE, diminuindo sua precisão (RMSD = 60,55 g m⁻² e e_m = 13,12) após este dia. Considerando-se todo o ciclo da cultura, conclui-se que os valores de RMSD e de e_m foram iguais a 43,69 g m⁻² e 11,57, respectivamente; esses valores são justificados pela variação

entre os valores estimados e os observados no final do ciclo (Figura 2). Os parâmetros da regressão linear entre os valores estimados e os observados e o coeficiente de determinação (Tabela 1) reforçam o ajuste entre os valores estimados pelo modelo e os observados experimentalmente.

Apesar dessas oscilações, de forma geral os valores estimados ficaram dentro do desvio padrão dos valores observados. Esta variação pode ser explicada pelo fato da determinação de matéria seca ser um processo destrutivo, ou seja, a cada coleta são selecionadas novas plantas. Segundo Zhang et al. (2002), a determinação de matéria seca com amostras destrutivas pode originar erro de amostragem ou inconsistência nas mudanças da matéria seca.

O comportamento do modelo quanto ao acúmulo de matéria seca no caule e raízes (Figura 2) foi semelhante ao comportamento obtido na simulação do acúmulo de matéria seca nas folhas. De forma geral, o acúmulo de matéria seca de caule estimado pelo modelo concordou bem com os resultados observados até os 67 DAE; no período de 70 a 112 DAE, os valores estimados subestimaram os observados em 16% ficando, porém, dentro do desvio padrão dos dados observados; na última coleta (117 DAE), os valores estimados e os observados foram iguais; semelhante ao que ocorreu em relação à matéria seca de folhas, o maior desvio entre os valores observados se deu na coleta realizada aos 93 DAE. Verifica-se, na Tabela 1, que o coeficiente de declividade ficou próximo de 1 fazendo com que a reta da equação ajustada também ficasse bem próxima da linha 1:1. O valor do erro percentual médio indica bom ajuste entre os valores observados e os estimados de matéria seca de caule enquanto o valor elevado da RMSD é, em grande parte, explicado pelas observações realizadas aos 75, 82, 93 e 103 DAE, que foram subestimados pelo modelo.

Analisando-se o acúmulo de matéria seca de raízes (Figura 2), verifica-se que a taxa de acumulação de matéria seca é menor até aproximadamente 24 DAE; torna-se maior no período de 24 a 59 DAE e volta a ser menor após 59 DAE. Apesar das dificuldades de coleta e limpeza das raízes, a determinação do acúmulo de matéria seca deste órgão não foi comprometida, como pode ser observado pela magnitude dos valores de desvio-padrão (Figura 2); de forma geral, os valores estimados de matéria seca de raízes se ajustaram bem aos dados observados. A maior diferença entre os resultados observados e os estimados é notada na coleta realizada aos 59 DAE, dia em que ocorreu o maior acúmulo de matéria seca (156 g m^{-1}); este valor é bem maior que os valores de matéria seca determinados nas coletas anterior e posterior; no entanto, verifica-se que, praticamente, não houve desvio padrão entre as repetições neste dia, indicando pequena possibilidade de ocorrência de erro na sua determinação; além disto, este valor pode ser decorrente de erro na amostragem (Zhang et al., 2002). A discrepância do valor observado nesse dia justifica, em parte, o alto valor da RMSD e do erro percentual médio (Tabela 1).

Os valores estimados de matéria seca acumulada no pendão, no sabugo e na palha da espiga acompanharam a tendência dos valores observados; mas a diferença entre eles foi grande, o que se reflete nos resultados estatísticos (Tabela 1). A grande variação entre os dados estimados e os observados

para essas variáveis, pode ser explicada, em parte, pela deficiência de informação na literatura sobre os coeficientes de respiração de manutenção e de conversão desses órgãos; os três componentes (pendão, sabugo e palha da espiga) da planta de milho corresponderam a apenas 14% da matéria seca acumulada na parte aérea da planta.

Analisando-se a curva experimental de acúmulo de matéria seca nos grãos (Figura 3), nota-se que o acúmulo ocorreu em três fases distintas: na primeira fase, dos 67 aos 75 DAE, na qual se observou menor taxa de acúmulo; na segunda, que se estendeu dos 75 aos 93 DAE, esta taxa foi maior e, posteriormente, na terceira fase, novamente uma taxa de acúmulo menor, até a maturação fisiológica da cultura. Este padrão de crescimento e enchimento de grãos, também constatado no trabalho de Costa & Barros (2001), é comum à cultura do milho e decorre, provavelmente, de sua fisiologia. Na primeira simulação do aumento de matéria seca nos grãos não se considerou a translocação da matéria seca perdida por senescência pelas folhas e caules, resultando em grande desvio em relação aos valores observados, principalmente a partir dos 80 DAE (Figura 3). No final do ciclo, o valor estimado de matéria seca nos grãos foi 10,2% inferior ao valor observado. Fisiologicamente, quando o suprimento de fotossintatos é insuficiente para satisfazer a demanda da taxa constante de crescimento dos grãos, ela é mantida pela remobilização de fotossintatos de outras partes da planta, como folhas e caule para os grãos (Rhoads & Bennett, 1990) e, neste sentido, modificou-se o modelo, considerando-se a translocação da matéria seca senescida nas folhas e no caule para a formação de grãos. Com esta alteração, ocorreu melhoria na simulação do aumento de matéria seca de grãos (Figura 3), mas, mesmo assim, pode-se inferir que o modelo não conseguiu gerar valores para acompanhar o aumento acelerado de matéria seca de grãos, observado no campo; por outro lado, a produção final de matéria seca de grãos estimada pelo modelo foi 9,8% superior à produção final observada, podendo-se considerar satisfatória a estimativa da produção final de matéria seca de grãos pelo modelo.

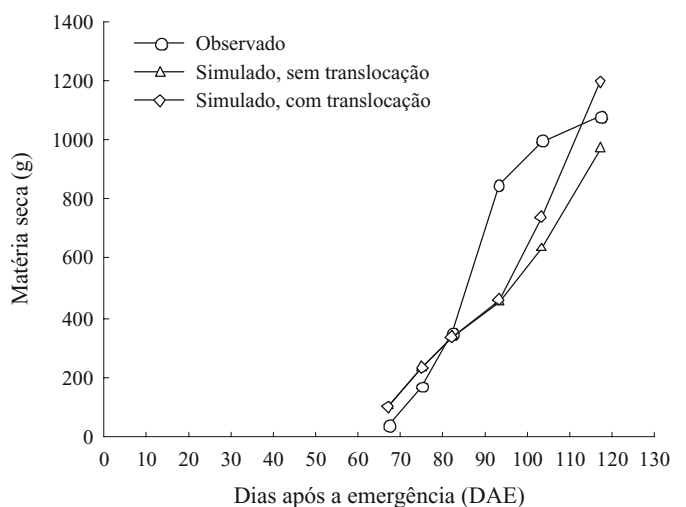


Figura 3. Valores acumulados de matéria seca de grão observado e estimado pelo modelo, considerando e não considerando a translocação de matéria seca de folhas e caule para os grãos

O processo de formação de grãos é muito complexo e sensível às condições internas da planta e do meio ambiente, o que torna a simulação do acúmulo de matéria seca, neste órgão, mais complicada, quando comparado com os demais órgãos da planta (Zhang et al., 2002). Costa & Barros (2001) também obtiveram piores resultados na simulação de matéria seca dos órgãos reprodutivos. Ma et al. (2003), realizando simulações de crescimento de planta com dados de vários anos agrícolas e utilizando o modelo RZWQM, observaram que, dependendo das condições climáticas e do nível de irrigação utilizado, o modelo subestima ou superestima os valores de produção de grãos de milho com variação de 10 a 35%. De forma semelhante ao que foi obtido neste trabalho, Arora & Gajri (2000) também notaram maiores valores de RMSD para os grãos em relação aos demais órgãos da planta, e consideraram bom o desempenho do modelo tendo em conta o desconhecimento e a complexidade de muitos processos de produção.

Na Figura 4 constam os valores de matéria seca da parte aérea da planta (MSPA) e a matéria seca da planta inteira (MSPI), ao longo do ciclo de desenvolvimento das plantas de milho. As simulações foram feitas considerando-se as alterações quanto ao cálculo do IAF e translocação de matéria seca para os grãos. Verifica-se pouca diferença entre a matéria seca da parte aérea e da planta inteira, demonstrando a pequena quantidade de matéria seca translocada para as raízes em relação à parte aérea; neste sentido, as discussões a seguir serão feitas somente em relação à matéria seca da parte aérea da planta.

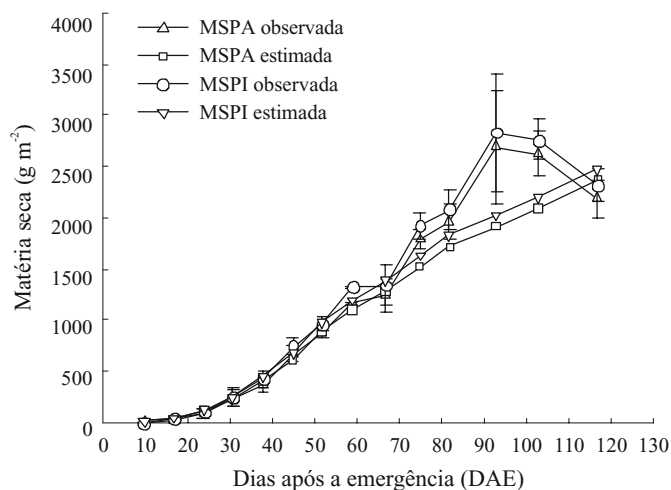


Figura 4. Valores acumulados de matéria seca da parte aérea da planta (MSPA) e da planta inteira (MSPI), observados e estimados ao longo do ciclo da cultura

Analisando-se a Figura 4, nota-se bom ajuste entre os valores estimados e os observados de matéria seca da parte aérea da planta, até o 67 DAE; desse dia até 114 DAE, o modelo subestimou o acúmulo de matéria seca da parte aérea da planta em relação aos dados observados; essa subestimativa do modelo em relação aos valores observados decorre do fato de não se ter conseguido simular o aumento acelerado de matéria seca nos grãos, conforme já discutido. O comporta-

mento do modelo no período entre 67 e 114 DAE, resultou em valores gerais de RMSD e e_m (Tabela 1) que indicam falta de ajuste do modelo para essa variável, apesar do alto valor de R^2 e do valor do coeficiente b ser próximo de um.

No final do ciclo da cultura do milho o modelo superestimou a produção de matéria seca na parte aérea da planta, em 8%, podendo-se considerar satisfatório este resultado. Ma et al. (2003) obtiveram superestimativa de 14% na matéria seca da parte aérea próximo do final do ciclo da cultura, enquanto Costa & Barros (2001) observaram comportamento contrário, isto é, no início do ciclo da cultura o modelo não estimou satisfatoriamente a produção de matéria seca da parte aérea da planta e só a partir dos 80 DAE é que se pode verificar melhor ajuste entre os dados observados e os estimados.

De forma geral, pode-se afirmar que o modelo implementado e testado representou adequadamente a tendência de crescimento e acúmulo de matéria seca nos diferentes órgãos da planta de milho, durante o ciclo de desenvolvimento vegetativo, mas durante o período de formação e enchimento de grãos o comportamento do modelo apresentou, para as variáveis avaliadas, discrepâncias em relação aos dados observados; neste sentido, os resultados obtidos corroboram com a afirmação de Costa & Barros (2001) quanto à necessidade de mais pesquisas visando determinar, para diferentes materiais genéticos e regiões do País, parâmetros relacionados à fisiologia da planta, principalmente durante o estágio reprodutivo, que permitam melhorar os resultados estimados por modelos de crescimento e desenvolvimento de plantas.

CONCLUSÕES

1. O modelo de crescimento e desenvolvimento de plantas de milho, sem se considerar a senescência das folhas, estimou muito bem os valores do índice de área foliar até 59 dias após a emergência e os subestimou após este dia.
2. A inclusão da senescência das folhas no modelo fez com que os valores estimados ficassem bem próximos dos valores experimentais, durante todo o ciclo da cultura.
3. Durante o estágio vegetativo o modelo estimou bem o acúmulo de matéria seca nas folhas, caule e raízes, porém, durante o estágio reprodutivo, o acúmulo de matéria seca estimado não acompanhou adequadamente o acúmulo observado de forma experimental.
4. A inclusão, no modelo, da translocação da matéria seca da folhas e caules para os grãos, melhorou os resultados simulados pelo modelo mas não foi suficiente para acompanhar o aumento acelerado de matéria seca nos grãos.
5. Sem a translocação de matéria seca o modelo subestimou a matéria seca no grão no final do ciclo em 10,2% e, com a translocação, a superestimou em 9,8%.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida, e à Fundação de

Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo auxílio à pesquisa e suporte financeiro.

LITERATURA CITADA

- Arora, V. K.; Gajri, P. R. Assessment of a crop growth-water balance model for predicting maize growth and yield in a subtropical environment. *Agricultural Water Management*, Amsterdam v.46, n. 2, p.157-166, 2000.
- Barros, A. H. C. Análise do crescimento, do desenvolvimento e da produtividade da cultura do milho (*Zea Mays L.*): Experimentos e modelos. Viçosa: UFV, 1998. 85p. Dissertação Mestrado
- Bonato, O.; Schulthess, F.; Baumgärtner, J. Simulation model for maize crop growth based on acquisition and allocation processes for carbohydrate and nitrogen. *Ecological Modelling*, Copenhagen, v.124, n.1, p.11-28, 1999.
- CFSEMG – Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. (5ª aproximação). Viçosa, UFV, 1999. 359p.
- Corrêa, M. M. Desenvolvimento e teste de modelo de transporte unidimensional de solutos no solo. Viçosa: UFV, 2001. 104p. Tese Doutorado
- Costa, L. C.; Barros, A. H. C. Desenvolvimento e teste de um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.9, n.1, p.75-82, 2001.
- Costa, S. N.; Martinez, M. A.; Martins, J. H.; Ferreira, P. A. SIMASS – Modelo para simular o transporte de água e solutos no solo I: Desenvolvimento e teste de sensibilidade. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.3, n.2, p.183-189, 1999.
- de Vries, F. W. T. P.; Jansen, D. M.; Ten Berge, H. F. M.; Bakema, A. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. *Simulation Monographs*, Pudoc: Wageningen, 1989. 271p.
- Doorenbos, J.; Kassan, A. H. Efectos del agua em el rendimiento de los cultivos. Roma: FAO, 1979. 212p. *Riego y Drenaje* n.33.
- Figueiredo, W. S. C. Determinação do fator de suscetibilidade e dos efeitos do índice diário de estresse sobre a produção de ervilha. Viçosa: UFV, 2002. 40p. Dissertação Mestrado
- France, J.; Thornley, J. H. M. *Mathematical models in agriculture. The quantitative approach to problems in agriculture and related sciences*. London: Butterworth, 1984. 334p.
- Kobayashi, K.; Salam, M. U. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agronomy Journal*, Madison, v.92, n.2, p.345-352, 2000.
- Larcher, W. *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: RiMa, 2000. 531p.
- Lima, M. G. Calibração e validação do modelo CERES-MAIZE em condições tropicais do Brasil. Piracicaba: ESALQ/USP, 1995. 119p. Tese Doutorado
- Ma, L.; Nielsen, D. C.; Ahuja, L. R.; Malone, R. W.; Saseendran, S. A.; Rojas, K. W.; Hanson, J. D.; Benjamin, J. G. Evaluation of RZWQM under varying irrigation levels in eastern Colorado. *Transactions of the ASAE*, Saint Joseph, v.46, n.1, p.39-49, 2003.
- Medeiros, S. L. P.; Gosse, G.; Chartier, M.; Manfron, P. A. Ajuste do módulo de produção de matéria seca no modelo CERES-Sorghum para simulação da cultura do sorgo sacarino. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.8, n.2, p.223-229, 2000.
- Oliveira, L. F. C.; Martinez, M. A.; Pruski, F. F.; Ruiz, H. A.; Lima, L. A. Transporte de solutos no solo e no escoamento superficial: I – Desenvolvimento do modelos de simulação do movimento de água e escoamento superficial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.4, n.1, p.63-69, 2000.
- Probert, M. E.; Dimes, J. P.; Keating, B. A.; Dalal, R. C.; Strong, W. M. APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems. *Agricultural Systems*, Gainesville, v.56, n.1, p.1-28, 1998.
- Rhoads, F. M.; Bennett, J. M. Corn. In: *Irrigation of agricultural crops*. Agronomy Monograph No 30, Madison, USA-CSSA-SSSA, 1990. p.569-597.
- Stickler, F. C.; Wearden, S.; Pauli, A. W. Leaf area determination in grain sorghum. *Agronomy Journal*, Madison, v.53, n.1, p.187-188, 1961.
- Taiz, L.; Zeiger, E. *Plant physiology*. California: Cummings Publishing, 1991. 565p.
- Thornley, J. H. M.; Johnson, I. R. *Plant and crop modelling*. New Jersey: Blackburn Press, 2000. 669p.
- Villa Nova, N. A.; Pedro Jr., M. J.; Pereira, A. R.; Ometto, J. C. Estimativa de graus-dia acumulados acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas máxima e mínima. São Paulo: USP, 1972. 8p. *Caderno de Ciência da Terra*
- Wolschick, D. Modelo SIMASS-C: inclusão da modelagem do crescimento e desenvolvimento do milho. Viçosa: UFV, 2004. 140p. Tese Doutorado
- Zhang, Y.; Changsheng, L.; Zhou, X.; Moore Iii, B. A simulation model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture. *Ecological Modelling*, Copenhagen, v.151, n.1, p.75-108, 2002.