

ISSN 0104-1347

# Desenvolvimento e teste de um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho<sup>1</sup>

Development and test of a simulation model for mayse growth and development

Luiz Cláudio Costa<sup>2</sup> e Alexandre Hugo César Barros<sup>3</sup>

**Resumo** - Um modelo mecanístico de simulação do crescimento, desenvolvimento e rendimento para a cultura do milho (*Zea mays* L.) foi desenvolvido e testado sob condições de campo. Baseado em dados meteorológicos, o modelo estima produção de matéria seca, índice de área foliar e o rendimento da cultura. O modelo foi testado utilizando-se dados obtidos em um experimento realizado na Estação Experimental de Vitória de Santo Antão, Pernambuco, da Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária – IPA. O modelo mostrou-se adequado na simulação do índice de área foliar (IAF), do acúmulo de matéria seca do caule, das folhas, das raízes, da matéria seca total e de rendimento da cultura do milho. O modelo obteve um ajustamento de 88% entre os dados simulados e observados no que se refere ao rendimento de grãos. Resultados obtidos pela análise de sensibilidade mostraram que o modelo apresenta alta sensibilidade aos parâmetros de eficiência fotossintética e respiração de manutenção.

**Palavras-chave:** milho, *Zea mays* L., modelo, simulação, produtividade.

**Summary** - An agrometeorological model was developed to simulate the growth, the development and yield of maize (*zea mays* L.). The model was tested with data obtained at the Experimental Station of Vitória de Santo Antão – PE, Brazil. The model is divided in three major parts. In the first part, the energetic gains represented by photosynthesis is computed. In the second one, the system losses relative to the maintenance and growth respiration is evaluated. In the third one, the daily dry matter is distributed for the various parts of the plant. The proposed model showed to be consistent to simulate growth, leaf area, development and the yield of maize crop. The model was very sensitive to the photosynthetic efficiency and the maintenance respiration parameters.

**Key words:** crop modelling, maize, yield.

## Introdução

O milho (*Zea mays* L.), devido a sua importância na dieta alimentar humana e animal, é uma das culturas mais difundidas no mundo. No Brasil, é cultivado em praticamente todas as regiões.

Apesar de apresentar um elevado potencial produtivo, o rendimento de grãos da cultura no Brasil é considerado baixo, atingindo uma média em torno de 2100kg ha<sup>-1</sup>. No Nordeste a situação é ainda mais drástica e o rendimento não ultrapassa os 700kg ha<sup>-1</sup> (FIBGE,1992).

<sup>1</sup>Trabalho realizado com o apoio da FAPEMIG.

<sup>2</sup>Agrometeorologista, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 36571-000, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. Bolsista do CNPq, e-mail: [l.costa@mail.ufv.br](mailto:l.costa@mail.ufv.br)

<sup>3</sup>Engenheiro Agrônomo, MS. Meteorologia Agrícola, Pesquisador IPA, CP 1022, CEP 50761-000, Recife, Pernambuco, Brasil, e-mail: [alex@ipa.br](mailto:alex@ipa.br)

A grande variabilidade dos fatores ambientais que influenciam a produtividade agrícola, aliado à redução acentuada dos recursos técnicos e financeiros disponíveis para a investigação científica, tem provocado um redirecionamento no planejamento dos projetos de pesquisa. Nesse sentido, o uso de modelos de simulação aplicados à agricultura vem ganhando um grande impulso. Apresentando como grandes características a multidisciplinaridade e o caráter integrador, os modelos de simulação tem se tornado ao longo dos anos uma ferramenta altamente eficiente e complementar às pesquisas experimentais convencionais (BOOTE et al., 1996; COSTA, 1997; PEREIRA, 1987).

Nas últimas décadas, vários modelos foram desenvolvidos para testar e avaliar a resposta da cultura do milho em diferentes condições ambientais (CURRY & CHEN, 1971; SPLINTER, 1974; LIU et al., 1989; LIMA, 1995). Tais modelos apresentam uma grande variabilidade nos parâmetros utilizados para a estimativa da eficiência fotossintética, da respiração de manutenção e de crescimento e da área foliar. No geral, a análise dos modelos de simulação desenvolvidos para a cultura do milho, mostram que o índice de área foliar e a distribuição de matéria seca ao longo do crescimento da cultura são as variáveis que ainda apresentam um baixo ajuste aos dados observados. Por outro lado, a produtividade de grãos estimada por estes modelos apresentam, em média, após a calibração, de 2 a 10% de erro, quando comparada com a produtividade observada (LIU et al., 1989; LIMA, 1995).

O presente trabalho teve como objetivos desenvolver e testar um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho, bem como analisar a sensibilidade das variáveis de estado do modelo aos parâmetros de eficiência fotossintética e respiração de manutenção.

## Material e métodos

O trabalho de campo foi conduzido na Estação Experimental de Vitória de Santo Antão, Pernambuco, pertencente a Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária, IPA. O experimento foi implantado em uma área de 356m<sup>2</sup> dividida em três parcelas de 10m x 10m. Foi utilizado a cultivar BR 3056 seleção IPA, resultante do programa de melhoramento genético para a cultura do milho em Pernambuco. A semeadura foi realizada em 25 de março de 1996, utilizando o espaçamento de 1,0m por 0,5m, com uma densidade

de 40.000 plantas ha<sup>-1</sup>. O solo foi mantido próximo a capacidade de campo, através de irrigações realizadas durante todo o ciclo da cultura. Para a irrigação foram utilizados aspersores com intensidade de aplicação de 8,64 mm/h. A irrigação foi realizada considerando o potencial matricial do solo, obtido por meio do Hidrosaver. Os teores de umidade foram coletados três vezes por semana.

Foram efetuadas coletas de cinco plantas por parcela, a cada cinco dias, durante os 30 primeiros dias depois da emergência. Após os 30 primeiros dias, as coletas foram realizadas com frequência de 10 dias. Nas coletas determinou-se a altura da planta, a área foliar, a matéria seca do caule, das folhas e das raízes. A matéria seca total foi obtida através do somatório do peso da matéria seca de todas as partes da planta.

Durante o ciclo da cultura foram também realizadas avaliações para caracterização dos estádios vegetativo, reprodutivo e de formação de grãos de acordo com o proposto por HANWAY (1963). Os dados meteorológicos foram obtidos da Estação Meteorológica de Vitória de Santo Antão-PE.

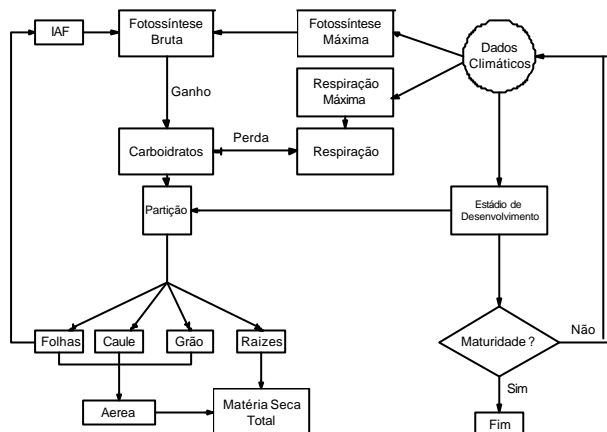
## Desenvolvimento do modelo

O modelo foi desenvolvido utilizando o software MODELMAKER (1994). O modelo é dividido em três partes principais. Na primeira, calcula-se o ganho de carbono diário do sistema por meio da fotossíntese bruta. Na segunda, consideram-se as perdas de carbono do sistema, ou seja, a respiração. Uma vez conhecido o balanço de carbono, a terceira parte considera a transformação do carbono em carboidrato e sua distribuição para as diversas partes da planta, ou seja, as folhas, o colmo, as raízes e os órgãos de armazenamento (Figura 1).

Os processos fisiológicos considerados foram a fotossíntese bruta diária (THORNLEY & JONHSON, 1990):

$$Pd = \frac{Pmh}{k} \ln \left[ \frac{\Omega + b + (2\Omega b + b^2)^{1/2}}{\Omega \exp^{-kIAF} + b + (2\Omega b \exp^{-kIAF} + b^2)^{1/2}} \right] \quad (1)$$

em que:  $\Omega = \alpha k / h$ ;  $\beta = (1 - \tau) P_m$ ;  $P_m = P_{m20} \Psi$ ;  $\Psi = (T_{med} + T_r) / (T_r - T_b)$ ;  $P_{m20}$  a fotossíntese máxima a 20°C (kg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>);  $T_r$  a temperatura de referência fixada em 10°C;  $T_{med}$  a temperatura média do ar (°C);  $T_b$  a temperatura base da cultura (°C);  $\alpha$  a eficiência fotossintética máxima (kg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>);  $\tau$  o coeficiente de transmissividade (adimensional);  $IAF$  o



**Figura 1.** Diagrama esquemático do modelo. Os retângulos representam a quantidade e taxa, os círculos dados de entrada, os quadrados as variáveis auxiliares, o triângulo uma decisão e as linhas, os fluxos de informações.

índice de área foliar (adimensional);  $P_m$  a fotossíntese bruta máxima ( $\text{kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ );  $h$  a duração do dia (s) e  $k$  o coeficiente de extinção da cultura (adimensional).

A respiração de manutenção foi calculada de acordo com o método proposto por DE VRIES et al. (1989):

$$R_m = R_{mr} \Psi \quad (2)$$

em que:  $R_m$  é a taxa de respiração máxima ( $\text{Kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) e  $R_{mr}$  a taxa de respiração de referência fixada a  $20^\circ \text{C}$  e  $\Psi$  como definido na equação 1.

A respiração foi considerada individualmente para cada parte da planta. A respiração de crescimento foi calculada para cada componente estrutural da planta levando-se em consideração a eficiência de conversão de carboidrato em matéria seca ( $E_g$ ), conforme DE VRIES et al. (1989).

A taxa de desenvolvimento da cultura foi considerada através de uma escala variando de 0 a 2, sendo 0, a emergência, 1 a antese e 2 a maturação fisiológica. O estabelecimento de cada estágio fenológico  $D$  (adimensional) é definido como a razão dos graus-dia (GD) acumulados pelo número total de graus-dia (GDT) que a cultura precisa para alcançar um determinado estágio fenológico.

Durante todo o desenvolvimento da cultura, o carboidrato disponível é alocado para as diferentes partes da cultura de acordo com THORLEY (1976), KEULEN & WOLF (1986) e DE VRIES et al. (1989).

O índice de área foliar (IAF) foi calculado de acordo com DE VRIES et al. (1989).

$$\text{IAF} = \text{MSF}/\text{PE} \quad (3)$$

em que  $\text{MSF}$  é a matéria seca das folhas ( $\text{kg m}^{-2}$ ) e  $\text{PE}$  a massa específica das folhas ( $\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}$ ).

O cálculo da senescência considerado no modelo assume que a partir de uma certa idade da cultura, as folhas, o caule e as raízes sofrem uma degradação constante. Esta degradação no momento da maturidade fisiológica da cultura varia de 40 a 75%. No modelo proposto, para cada parte da planta e dependendo do estágio de desenvolvimento da cultura, foram consideradas perdas de 0,020 para as folhas, 0,015 para o caule e 0,001 ( $\text{kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) para as raízes (KEULEN et al. 1982; GOUDRIAN & LAAR, 1994; DE VRIES, et al. 1989).

O acúmulo de matéria seca, ao longo do tempo é descrito por DE VRIES et al. (1989) da seguinte forma:

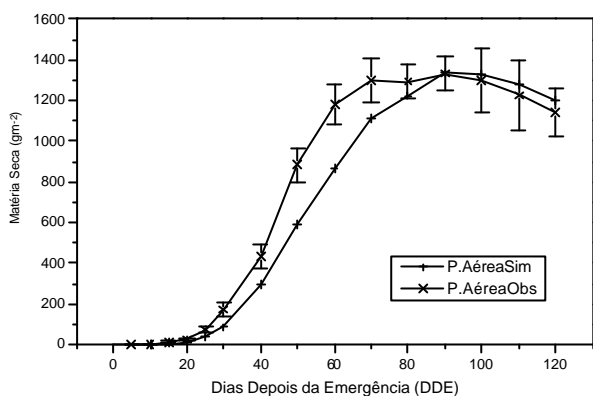
$$\frac{dW}{dt} = (Pd - Rm.w)Eg \quad (4)$$

em que  $dw/dt$  é a variação de matéria seca ( $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) e  $E_g$  a respiração de crescimento, isto é, a eficiência de conversão de carboidratos em matéria seca ( $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Para cada parte estrutural da planta  $E_g$  assume um valor de acordo com DE VRIES, et al. (1989).

## Resultados e discussão

Na Figura 2 são apresentados os resultados simulados e observados da matéria seca da parte aérea da cultura em função dos dias depois da emergência (DDE). Observa-se um bom ajustamento dos dados simulados pelo modelo aos valores observados até cerca de 25 DDE. No período de 30 a 80 DDE, o modelo subestimou os valores observados voltando, a partir daí, a apresentar valores próximos aos valores observados.

A distribuição de matéria seca das folhas em função dos dias depois da emergência encontra-se na Figura 3. Do início do crescimento até 50 DDE, observa-se que o modelo subestimou os dados observados, não sendo capaz de acompanhar o rápido crescimento foliar observado no campo. Durante o período de 60 a 110 DDE verifica-se um melhor ajustamento do modelo aos dados observados. Estes resultados indicam que o modelo foi capaz de estimar a

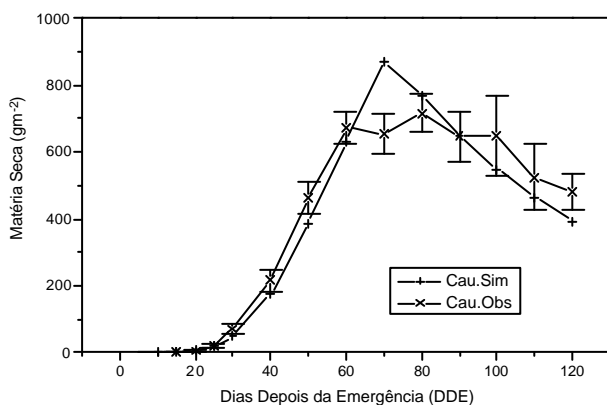


**Figura 2.** Matéria seca total para da parte aérea do milho BR 3056 observada e calculada.

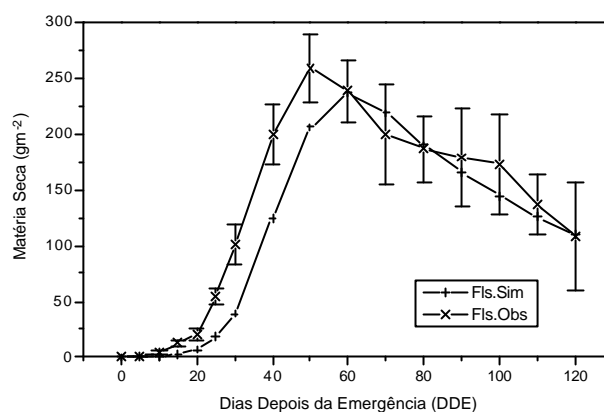
senescência foliar, que se iniciou exatamente no início da formação dos grãos (60 DDE).

Na Figura 4 são apresentados os resultados observados e simulados da matéria seca do caule. No geral observa-se que o modelo foi capaz de acompanhar o acúmulo de matéria seca do caule, apesar de uma tendência a superestimar a matéria seca no período de 60 a 90 DDE.

Os dados de distribuição de matéria seca total das raízes são apresentados na Figura 5. O grau de dificuldade para extração e medição da matéria seca das raízes pode ter comprometido as análises dos va-



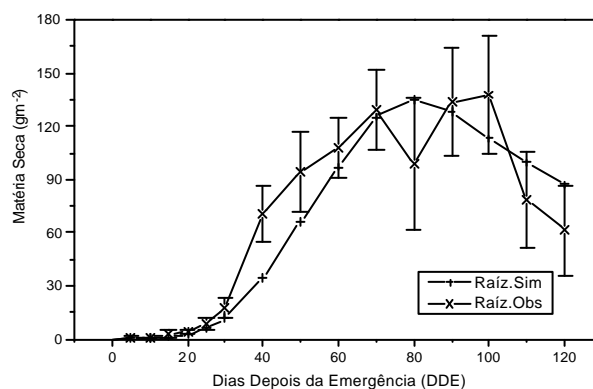
**Figura 4.** Matéria seca total do caule do milho BR 3056 observada e calculada.



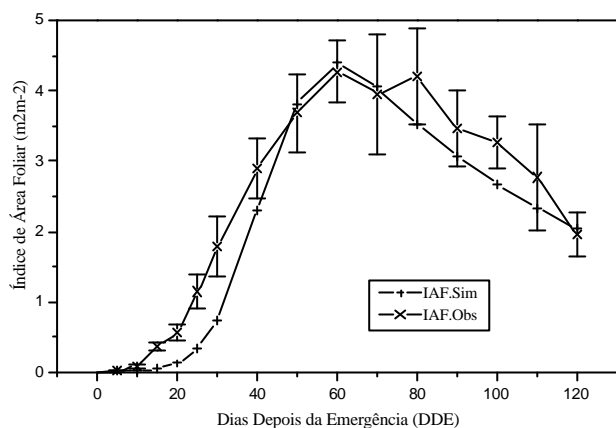
**Figura 3.** Matéria seca total das folhas do milho BR 3056 observada e calculada

lores observados, como pode ser observado através da magnitude dos valores de desvios padrão. No entanto, verifica-se que existe um adequado ajuste entre os dados observados e simulados durante os períodos compreendidos de 0 a 30 DDE. Esta tendência é verificada em praticamente toda distribuição de matéria seca para as diversas partes da planta. Na fase de crescimento exponencial da cultura, as variações são mais intensas e os processos físicos e biológicos são mais complexos de serem estimados (HUNT, 1981).

Na Figura 6 é apresentado o índice de área foliar (IAF). Os resultado mostram que durante todo o



**Figura 5.** Matéria seca total das raízes do milho BR 3056 observada e calculada.



**Figura 6.** Índice de área foliar do cultivar de milho BR 3056 observada e simulado.

período, exceto no período de 50 a 70 DDE, os valores simulados tendem a subestimar os valores observados. Verifica-se, no entanto, que o modelo é capaz de prever a queda do IAF e ainda, que durante todo o ciclo o IAF simulado tende a ficar bem próximo ao valor observado. Os valores de IAF máximo observado e simulado foram de 4,2 e 4,4, ambos ocorridos aos 60 DDE.

Os resultados da área específica (Figura 7) mostram que, durante os 25 primeiros DDE, a área foliar específica observada é muito superior, à média assumida pelo modelo. Enquanto que de 25 a 50 DDE os valores observado encontram-se abaixo do valor utilizado no modelo. De 60 a 120 DDE os valores observado são bem próximos ao valor utilizado pelo modelo.

A Figura 8 apresenta a distribuição de matéria seca para a espiga, compreendendo a palha e o grão. Os resultados indicam que a partição de fotoassimilados para os órgãos reprodutivos, observadas no campo, tem início em torno de 40 DDE. No entanto, no modelo, o crescimento dos órgãos reprodutivos só tem início após o término da fase vegetativa da cultura, ou seja, em torno de 65 DDE. O rendimento de grãos observado e simulado foi de  $4.100\text{kg ha}^{-1}$  e  $4.569\text{kg ha}^{-1}$ , respectivamente. Estes valores estão dentro das médias observadas ao longo dos anos para a cultivar BR 3056, sob regime irrigado na região da Zona da Mata de Pernambuco.

É importante destacar alguns fatores que tem alta influência nos valores de rendimento obtidos pelos

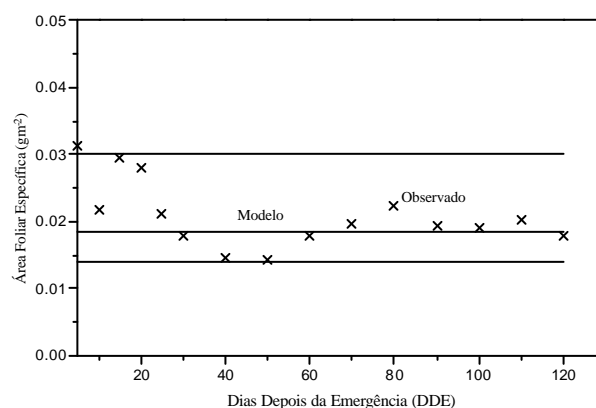
modelos. A respiração realizada por diferentes partes da cultura, ou seja, folhas, caule e raízes, tem grande influência nestes valores, no entanto, existe baixa disponibilidade de resultados experimentais. Mais importante ainda é a influência da respiração dos órgãos reprodutivos na produtividade, e mais uma vez se observa a quase que total inexistência de tais dados.

Valores entre  $0,015$  e  $0,030\text{Kg CO}_2\text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  vem sendo utilizados em diferentes modelos utilizados para representar a taxa respiração de manutenção da cultura do milho (BOONS-PRINS et al., 1993; DE VRIES et al., 1989; GOUDRIAN & LAAR, 1994). Tal amplitude de valores leva a uma grande variação nos valores simulados de rendimento de grãos. Tal fato mostra a importância de se conhecer melhor, para os diferentes materiais genéticos dos cultivares mais semeados nas regiões e no país, as informações necessárias, que permitam modelar de forma mais realística a taxa de respiração.

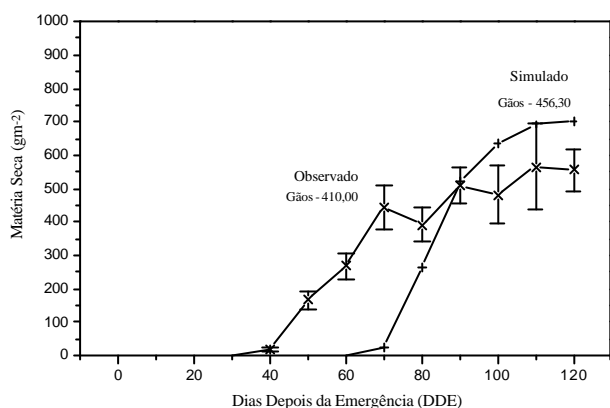
#### Análise de sensibilidade

Nas regiões tropicais, onde a disponibilidade de radiação não é fator limitante para a realização de fotossínteses pelas culturas, a simulação da taxa fotossintética das culturas é mais dependente do parâmetro que representa a declinação da curva de resposta de fotossínteses à irradiância, ou seja, a eficiência fotossintética ( $\alpha$ ) inicial da planta do que do parâmetro de fotossínteses máxima ( $P_{\text{max}}$ ).

A Figura 9 mostra a análise de sensibilidade do modelo a variação do parâmetro  $\alpha$ . Os valores de acúmulo de matéria seca total da parte aérea, das folhas, do caule e das raízes e o rendimento de grãos



**Figura 7.** Área foliar específica do cultivar de milho BR 3056 observada e atribuída pelo modelo.



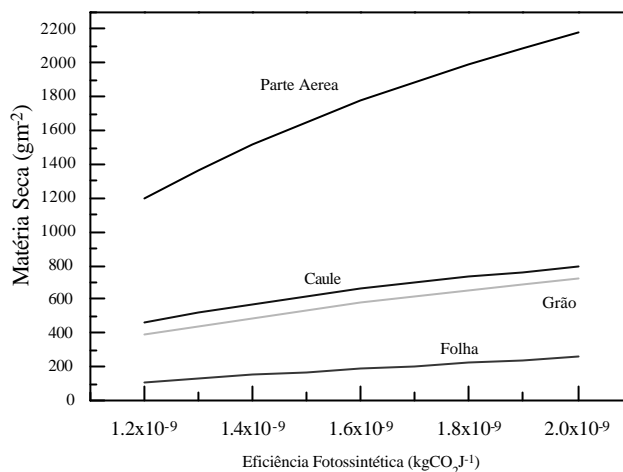
**Figura 8.** Distribuição de matéria seca dos órgãos reprodutivos observado e simulado (palha, grão e espigas) do cultivar de milho BR 3056.

aumentaram significativamente em resposta a mudança de apenas  $1.0E-09 \text{ kg CO}_2 \text{ J}^{-1}$ , ou seja 1%, no valor de  $\alpha$ . Esta grande sensibilidade do modelo ao parâmetro de eficiência fotossintética indica a necessidade de estabelecer experimentos específicos para a obtenção destes valores.

Os valores utilizados em diferentes modelos de simulação de crescimento e rendimento da cultura do milho para o parâmetro  $\alpha$  estão entre  $1.1e^{-09}$  e  $2.5e^{-09} \text{ kg CO}_2 \text{ J}^{-1} \text{ s}^{-1}$  (BOONS-PRINS et al., 1993; DE VRIES et al. 1989).

Na Figura 10 é apresentada a análise de sensibilidade do modelo ao parâmetro da respiração de manutenção ( $R_m$ ). Os valores recomendados para a cultura do milho oscilam de  $0,015$  a  $0,030 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , dependendo do componente estrutural da planta. Os resultados indicam uma grande sensibilidade da matéria seca dos diferentes componentes da planta em resposta à variação da respiração de manutenção.

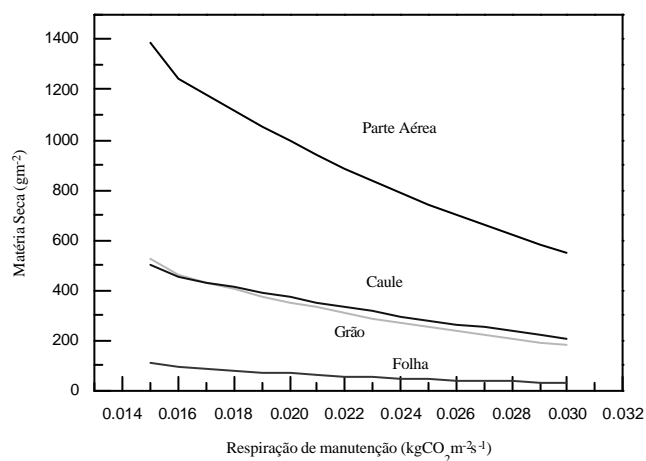
Os resultados apresentados acima indicam que variações nos valores da respiração de manutenção da cultura levam a grandes variações no acúmulo de matéria seca nas diferentes partes da planta, e conseqüentemente no rendimento. Assim, a obtenção de tais parâmetros através de experimentação apropriada é de fundamental importância para aumentar a capacidade dos modelos em prever o crescimento e o rendimento da cultura do milho.



**Figura 9.** Análise de sensibilidade da matéria seca parte aérea, das folhas, do caule e da produtividade final de grãos, relativa à eficiência fotosintética ( $\alpha$ ).

## Conclusões

- Os diferentes módulos considerados no modelo proposto mostram-se capazes de, no geral, representar adequadamente a tendência de crescimento e de acúmulo de matéria seca nos diversos órgãos da cultura do milho. No entanto, uma análise mais rigorosa mostra que o modelo não é capaz de acompanhar com a mesma precisão as variações de matéria seca durante o estágio reprodutivo. Os dados calculados do acúmulo de matéria seca obtidos neste estágio são menos precisos, quando



**Figura 10** Análise de sensibilidade da matéria seca parte aérea, das folhas e do caule e produtividade de grãos, relativa à respiração de manutenção ( $R_m$ ).

comparados com os resultados obtidos para a fase de crescimento lento e a fase de maturação fisiológica.

- Os resultados de análise de sensibilidade mostram alta dependência dos valores simulados a variações nos parâmetros de eficiência fotossintética e respiração de manutenção.
- A distribuição de carboidratos para as diversas partes da planta utilizados pelos diferentes modelos de simulação, inclusive pelo aqui apresentado, é baseada em processos empíricos, e portanto ainda pouco detalhada. Como o mecanismo de partição de carboidratos depende de inúmeras variáveis e de fatores ambientais, tais como fotoperíodo, temperatura do ar, umidade do solo e nutrição mineral, esta é uma parte que necessita ser estudada em mais detalhes nos experimentos para inclusão nos modelos de simulação.
- O modelo mostra um grande potencial na predição da distribuição da matéria seca e, principalmente, na produtividade da cultura do milho. Por outro lado, a análise dos resultados enfatiza a necessidade de se desenvolver pesquisas experimentais específicas, que possam contribuir para o desenvolvimento de modelos de simulação mais eficientes para as condições do Brasil.

## Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos ao pesquisador Augusto Arcoverde (in memoriam) da Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária, IPA e ao professor Gilberto Sedyama da Universidade Federal de Viçosa, UFV pelo apoio e sugestões.

## Referências bibliográficas

- BOONS-PRINS, E.R., KONING, G.H.J., VAN DIPPEN, C.A. et al **Crop specific simulation parameters for yield forecasting across the European Community**. Wageningen, Netherlands, 1993, 204 p.
- BOOTE, K.J., JONES, J.W., PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop model. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 704-716, 1996.
- COSTA, L.C. Modelagem e simulação em Agrometeorologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., Piracicaba, SP, 1997. **Suplemento dos anais**. Piracicaba : Sociedade

Brasileira de Agrometeorologia/ Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1977, p. 3-6.

- CURRY, R.B., CHEN, H. Dynamic simulations of plant growth. Part II. Incorporation of actual daily weather data and partitioning of net photosynthate. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 14, p. 1170-1175, 1971.
- DE VRIES, F.W.T., JANSEN, D.M., TEN BERGE, H.F.M. et al. **Simulation of ecophysiological process of growth in several annual crops**. Wageningen : Pudoc, 1989. 271 p.
- FIBGE. **Anuário Estatístico do Brasil**. Rio de Janeiro : IBGE, 1992. 700 p.
- GOUDRIAN, J., LAAR, H.H.V. **Modelling potential crop growth processes**. Netherlands : Academic Publishers, 1994. 238 p.
- HANWAY, J.J. Growth stages of corn (*Zea mays*, L.). **Agronomy Journal**, Madison, v. 55, n. 5, p. 487-492, 1963.
- HUNT, R. Concepts in plant growth analysis. In: **Plant growth curves; the theoretical approach to plant growth**. London : Edward Arnold, 1982. Cap.2, p. 14-46.
- HUNT, R. The Fitted curve in plant Growth studies In: ROSE, D.A., CHARLES-EDWARDS, D.A. **Mathematics and Plant Physiology**. London : Academic Press, 1981, p. 283-298.
- KEULEN, H. VAN., WOLF, J. **Modelling of agricultural production: Weather, soils and crops**. Centre for Agricultural Publishing and Documentation : Pudoc Wageningen, Netherlands. 1986. 497 p.
- KEULEN, H.V., VRIES, F.W.T.P., DREES, E.M. A summary model for crop growth. In: VRIES, F.W.T.P.; LAAR, H.H.V. **Simulation of plant growth and crop production**. Simulation Monographs : Pudoc, Wageningen, 1982. p. 87-97
- LIMA, M.G. **Calibração e validação do modelo CERES-MAIZE em condições tropicais do Brasil**. Piracicaba : ESALQ/USP, 1995. 119 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz , USP, 1995.
- LIU, W.T.H., BOTNER, D.M., SAKAMOTO, C.M. Application of CERES-Maize model to yield prediction of Brazilian maize hybrid. **Agricultural and Forest Meteorology**. Amsterdam, v. 45 n. 3/4, p. 299-312, 1989.
- MODELMAKER, **Version 2.0 SB Technology**. Scientific Publishing Limited : Oxford, Great Britian, 1993, 1994.
- PEREIRA, A.R. Simulação do crescimento e da produtividade. SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE

ÁGUA NA AGRICULTURA, 1997. Campinas, SP, **Anais...**, Campinas : Fundação Cargill. v. 17, p. 201-209. 1987.

SPLINTER, W.E. Modelling of plant growth for yield prediction. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 14, p. 243-245, 1974.

THORNLEY, J.H., JOHNSON, I.R. **Plant and crop modeling**. London : Clarendon Press, Oxford Science Publications, 1990. 144 p.

THORNLEY, J.H.M. **Mathematical models in plant physiology: a quantitative approach to problems in plant physiology**. London : Academic Press, 1976, 318 p.



