

## ESTIMATIVAS DA NECESSIDADE DE NITROGÊNIO PARA PRODUÇÃO DE GRÃOS E SILAGEM DE MILHO<sup>1</sup>

MARCIELA RODRIGUES SILVA<sup>2</sup>, THOMAS NEWTON MARTIN<sup>3\*</sup>, PAULO SERGIO PAVINATO<sup>4</sup>,  
MARCOS DA SILVA BRUM<sup>3</sup>

**RESUMO** – A modelagem para a agricultura é uma ferramenta matemática que permite ponderar os efeitos de fatores ambientais ou de manejo sobre a produtividade das culturas. Nessa ótica, objetivou-se com o presente trabalho avaliar a eficiência de modelos matemáticos na estimação da produtividade da cultura do milho em relação a necessidade de adubação nitrogenada. As estimativas da adubação nitrogenada foram realizadas para se obter as produtividades potencial e deplecionada de grãos e silagem de genótipos de milho. O Modelo 1 foi baseado em estimativas obtidas em dados da literatura e o Modelo 2 em estimativas geradas pelo modelo alternativo proposto, calibrado com dados observados no experimento. Para avaliar o desempenho dos modelos foram utilizados indicadores estatísticos tais como: coeficiente de correlação de Pearson; índice de concordância de Willmott; índice de desempenho de Camargo; porcentagem de desvio; e quadrado médio do erro. Recomendações de nitrogênio geradas pelos modelos para as produtividades potenciais e deplecionadas tanto de grãos quanto de silagem foram elevadas em comparação com os aplicados atualmente pelas recomendações da cultura. O genótipo AG30A91 obteve maior índice de área foliar, refletindo em maiores estimativas de produtividades potencial e deplecionada de grãos e silagem. O modelo 2 pode ser utilizado na estimativa da produtividade de grãos e silagem e na simulação da necessidade de nitrogênio para produção de grãos, porém necessita de ajustes para estimar as necessidades de nitrogênio para a produção de silagem. Ambos os modelos são eficientes na simulação do ciclo da cultura.

**Palavras-chave:** Adubação nitrogenada. Modelagem. Simulação. *Zea mays* L.

### ESTIMATING THE NEED FOR NITROGEN IN THE PRODUCTION OF GRAIN AND SILAGE

**ABSTRACT** - The modeling for agriculture is a mathematical tool that allows us to weigh the effects of factors, environmental or management on crop productivity. Therefore, the aim of this study was to evaluate the efficiency of mathematical models, in the estimation of the productivity of maize over the need for nitrogen fertilization. Estimates of nitrogen fertilization were performed to obtain the potential productivity and depleted grain yield and silage corn genotypes. The Model 1 was based on estimates obtained in the literature and Model 2 on estimates generated by the proposed alternative model, calibrated with data observed in the experiment. To evaluate the performance of the models we used statistical indicators, such as Pearson correlation coefficient, Willmott agreement index, the performance index of Camargo, percentage deviation and medium square error. Recommendations of nitrogen generated by the models for the potential productivity and depleted much grain as silage were higher compared with the recommendations of the culture ways. The AG30A91 genotype had a higher leaf area index, reflecting higher estimates of potential productivity and depleted grain and silage. The model 2 can be used to estimate the yield of grain and silage and the need for simulation of nitrogen for grain production, however, requires adjustments to estimate nitrogen needs for the production of silage. Both models are efficient in simulating the crop cycle.

**Keywords:** Nitrogen fertilization. Modeling. Simulation. *Zea mays* L.

\*Autor para correspondência

<sup>1</sup>Recebido para publicação em 03/03/2014; aceito em 24/04/2015.

<sup>2</sup>Departamento de Agronomia, UFPR, Caixa Postal 19061, 81531-990, Curitiba (PR); marciela-rodrigues@hotmail.com.

<sup>3</sup>Departamento de Fitotecnia, UFSM, 97105-900, Santa Maria (RS); martin.ufsm@gmail.com, marcosbrum@yahoo.com.br.

<sup>4</sup>Departamento de Solos, ESALQ/USP, Caixa Postal 11, 13418-260, Piracicaba (SP); pavinato@usp.br.

## INTRODUÇÃO

As recomendações de nitrogênio para a cultura do milho são baseadas em informações geradas entre 1960 e 1980, as quais relacionam o teor de matéria orgânica, a expectativa de rendimento e o histórico da área. Com o surgimento de híbridos mais produtivos e maiores necessidades de produção de grãos talvez haja a necessidade de ajustes nas quantidades aplicadas de nitrogênio para a produção de milho.

O estado do Paraná não possui boletim oficial para recomendação de adubação e calagem do solo, sendo utilizados os boletins dos estados de São Paulo, Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Assim, considerando que as quantidades de nutrientes sugeridas pelas tabelas seguem médias que podem ser consideradas inapropriadas para determinadas situações, a subestimação ou superestimação da dose de nitrogênio a ser utilizada pode ocorrer frequentemente, reduzindo a produtividade ou aumentando os riscos de poluição ambiental.

Essas lacunas associadas ao fato de que as respostas ao manejo do nitrogênio são muito variáveis, uma vez que os processos envolvidos na dinâmica deste nutriente são altamente influenciados pelo ambiente, justificam a necessidade de uma ferramenta mais abrangente que contemple de forma integrada a influência dos diversos fatores envolvidos na dinâmica desse nutriente. Assim, sugere-se que as recomendações de adubação nitrogenada para a cultura do milho sejam mais coerentes do ponto de vista técnico e, principalmente, mais propensas a ajustes com bases científicas, em relação às tabelas, mediante o desenvolvimento e utilização de sistemas para recomendação de adubação baseados em modelos matemáticos (TOMÉ JÚNIOR, 2004).

A simulação por meio da modelagem permite prever a produtividade da cultura do milho relacionada com a necessidade de adubação nitrogenada em função da absorção desse elemento e extração do mineral na área colhida. Outra vantagem da utilização da modelagem para investigar o manejo da fertilização nitrogenada é a possibilidade de estudar as interações desta fertilização com outros fatores, permitindo gerar cenários, considerando as diversas combinações dos fatores que influenciam a produtividade das culturas e possibilitem a realização de simulações e adaptações à medida que novos conhecimentos são acumulados, além de nortear os futuros trabalhos de pesquisa na região, objetivando melhorar a produtividade da cultura.

Dentre os trabalhos relacionados à simulação das produtividades de grãos e silagem para a cultura do milho em função da adubação nitrogenada destaca-se o modelo proposto por Martin e Pavinato (2010), que estimam as produtividades da cultura do milho para as condições de solo e clima da região sudoeste do Paraná. Ademais, a cultura do milho possui outros exemplos de aplicações práticas de

modelagem no Brasil, incluindo os estudos que avaliam o acúmulo de matéria seca e a produtividade de grãos (DOURADO NETO et al., 2005), a produtividade potencial de acordo com valores médios diários de temperatura do ar e radiação solar (ASSIS et al., 2006), a área foliar (MANFRON et al., 2003), as produtividades potenciais e deplecionadas para a cultura no Rio Grande do Sul (BONECARRÈRE et al., 2007) e a produtividade de grãos deplecionada com o balanço hídrico do solo (DOURADO NETO et al., 2004). Contudo, novas pesquisas são necessárias para ampliar os horizontes, suprindo-se as lacunas do conhecimento, principalmente no que se refere à extração e a necessidade de adubação de macro e micronutrientes, sendo a pesquisa, nesse sentido, passível de aprofundamento, devido à grande importância desse cereal para a economia e a escassez de estudos que correlacionam a modelagem com as exigências nutricionais. Dessa forma, objetivou-se avaliar a eficiência da modelagem matemática na estimação das produtividades potencial e deplecionada de grãos e silagem da cultura do milho relacionada à necessidade de adubação nitrogenada.

## MATERIAL E MÉTODOS

A simulação das produtividades potencial e deplecionada foi realizada considerando-se uma lavoura comercial de milho localizada no município de Dois Vizinhos (PR), situada na altitude média de 520 m, latitude de 25°44' Sul e longitude de 53°04' Oeste. O clima predominante da região é do tipo subtropical úmido mesotérmico (Cfa), segundo a classificação de Köppen (MAACK, 1968), e a região compõe fisiograficamente o Terceiro Planalto Paranaense. O solo pertence à Unidade de mapeamento Nitossolo Vermelho Distroférrico úmbrico, textura argilosa, fase floresta subtropical perenifolia e relevo ondulado (BHERING; SANTOS, 2008). Os dados diários referentes às variáveis temperaturas (média, mínima e máxima), precipitação, insolação, radiação solar e pressão atmosférica foram obtidos na estação meteorológica situada no *Campus* Dois Vizinhos, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, para os meses de março de 2007 a julho de 2011.

O cenário proposto para a simulação do crescimento e desenvolvimento da cultura se refere a um genótipo de milho de ciclo precoce (860,05 °C dia<sup>-1</sup> para o florescimento). A estimação da adubação nitrogenada foi realizada em duas condições de desenvolvimento da cultura (produtividade potencial e produtividade deplecionada). Na condição de produtividade potencial considerou-se não haver estresse de ordem hídrica, com valores de temperatura reais ocorridos em novembro de 2009 a outubro de 2010, utilizando-se a insolação máxima diária (igual ao fotoperíodo), e inexistência de competições/interferência no desenvolvimento das plantas de milho por pragas, doenças e plantas daninhas. Na con-

dição de produtividade deplecionada considerou-se a temperatura, precipitação e insolação ocorridas no local de estudo. A partir desses dados foi realizado a redução da produtividade potencial por meio do balanço hídrico.

A estimativa da radiação fotossinteticamente ativa foi obtida por intermédio dos valores de insolação diária ( $h\ d^{-1}$ ), sendo a sua estimativa obtida por meio das equações abaixo. A declinação solar ( $d$ , radianos) depende somente da posição relativa entre a Terra e o Sol, podendo ser calculada conforme a equação apresentada por Pereira et al. (2002) (equação 1).

$$\delta_j = 23,45 \cdot \text{sen} \left[ \left( \frac{360}{365} \right) (J - 80) \right] \quad (1)$$

em que  $J$  é o número de ordem do dia do ano (dia Juliano).

O cálculo do ângulo horário do nascer do sol ( $H_j$ ) é dado pela equação 2:

$$H_j = a \cos(-\text{tg}(\Phi) \cdot \text{tg}(\delta_j)) \quad (2)$$

em que  $\Phi$  é a latitude do local e  $d_j$  a declinação solar.

O fotoperíodo ( $N$ ,  $h\ d^{-1}$ ) é referente ao intervalo entre o nascer e o pôr-do-sol em um determinado dia, também chamado de duração do dia, calculado pela seguinte equação (3):

$$N_j = \frac{2 \cdot H_j}{15} \quad (3)$$

A irradiância solar extraterrestre diária que atinge uma superfície horizontal no topo da atmosfera ( $Q_0$ ,  $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ ) é função da latitude e da declinação solar (equação 4).

$$Q_{0j} = 37,6 \left[ 1 + 0,033 \cdot \cos \left( \frac{360}{365} \cdot ND_j \right) \right] \left[ \left( \frac{\pi}{180} \right) H_j \cdot \text{sen} \Phi \cdot \text{sen} \delta_j + \cos \Phi \cdot \cos \delta_j \cdot \text{sen} H_j \right] \quad (4)$$

A estimativa da irradiância solar global diária ( $Qg_j$ ,  $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ ) é função da irradiância solar extraterrestre diária, da absorção, da difusão atmosférica e da insolação (equação 5):

$$Qg_j = Q_{0j} \cdot \left[ 0,29 \cdot \cos \Phi + 0,52 \cdot \frac{n_j}{N_j} \right] \quad (5)$$

em que  $n_j$  é a insolação no dia juliano  $j$ .

A radiação fotossinteticamente ativa ( $q_j$ ,  $cal\ cm^{-2}\ min^{-1}$ ) foi estimada por intermédio da

equação apresentada por Assunção (1994) (equação 6):

$$q_j = \frac{Qg_j}{N_j \cdot 60} \cdot \left( 0,5 - 0,1 \cdot \frac{n_j}{N_j} \right) \quad (6)$$

A assimilação de dióxido de carbono foi apresentada por Heemst (1986) em plantas C4, que propõe o seguinte modelo para assimilação de  $CO_2$  (equação 7):

$$Adc_j = a \cdot e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{c} \left[ \ln \left( \frac{q}{b} \right) \right]^2 + \frac{1}{f} \left[ \ln \frac{Tm}{d} \right]^2 \right\}} \quad (7)$$

em que  $Adc_j$  é referente à assimilação de  $CO_2$  ( $L\ cm^{-2}\ h^{-1}$ ),  $q$  a radiação solar absorvida ( $cal\ cm^{-2}\ min^{-1}$ ,  $0 < q \leq 0,4$ ),  $Tm$  a temperatura média diária ( $^{\circ}C$ ,  $15 \leq T \leq 35$ ) e os coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $f$  aos parâmetros empíricos determinados através de análise de regressão múltipla ( $a = 262,9636617\ L\ cm^{-2}\ h^{-1}$ ;  $b = 0,468547664\ cal\ cm^{-2}\ min^{-1}$ ;  $c = 1,230198161$ ;  $d = 33,54420813\ ^{\circ}C$ ; e  $f = 0,538660895$ ).

Considerando-se a massa bruta do carboidrato produzida como sendo o valor médio diário ( $C$ ), estimado a partir do número de graus-dia, da emergência ao florescimento ( $Gdf$ ,  $^{\circ}C\ dia$ ) e da duração da fase reprodutiva, conhecendo-se o fotoperíodo médio do ciclo ( $H$ ) e o índice de área foliar diário ( $IAF$ ,  $m^2\ m^{-2}$ , equação 8), obtido a partir do  $IAF$  nas diferentes fases, pode-se estimar a produtividade do carboidrato total ( $MCH_2O$ ,  $kg\ ha^{-1}\ C^{-1}$ ) por meio das seguintes equações:

$$IAF_j = \alpha_0 \cdot Dr_j^3 + \alpha_1 \cdot Dr_j^2 + \alpha_2 \cdot Dr_j \quad (8)$$

$$FC_{IAF_j} = b_0 \cdot Po + b_1 \quad (9)$$

$$IAFC_j = IAF_j \cdot FC_{IAF_j} \quad (10)$$

em que  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  se referem aos parâmetros empíricos determinados por intermédio da análise de regressão, sendo  $\alpha_0 = -27,139\ m^2\ m^{-2}$ ,  $\alpha_1 = 25,999\ m^2\ m^{-2}$  e  $\alpha_2 = 3,1745\ m^2\ m^{-2}$ . O fator de correção do  $IAF$  ( $FC_{IAF_j}$ ), em que  $b_0$  é equivalente a 0,1176,  $b_1$  equivalente a 0,2915 e  $Po$  é o número de plantas por metro quadrado (cinco). O  $IAF$  é o fator de correção ( $FC_{IAF_j}$ , equação 9) para a densidade de plantas ( $Po$ , plantas  $m^{-2}$ ) e o  $IAF$  corrigido ( $IAFC_j$ , equação 10), bem como os parâmetros empíricos 1 foram propostos por Figueiredo Júnior et al. (2005).

$$M_{CH_2O} = \frac{36,585 \cdot P \cdot ACD_j \cdot IAF_j \cdot C \cdot N_j}{T + 273} \quad (11)$$

em que P se refere à pressão atmosférica local (valor utilizado igual a 953 mm Hg) e T à temperatura do ar (°C). O ciclo da cultura (equação 12) foi obtido por meio do número de graus-dias para o florescimento do genótipo ( $GD_f$ ):

$$C = \frac{GD_f}{T - T_b} + D_{fr} \quad (12)$$

em que  $T_b$  se refere à temperatura basal (10°C) da cultura (VILLA NOVA et al., 1972),  $D_{fr}$ , à duração da fase reprodutiva (dias), que no caso de milho para grão foi de 65 dias e do milho para silagem foi de 45 dias e T equivale a temperatura média diária.

A transformação da massa bruta do carboidrato total final ( $MCH_2O$ ) em massa de matéria seca dos diferentes órgãos (grãos, folhas, colmo e raízes) deve ser realizada segundo alguns estudos teóricos. A partir de dados experimentais apresentados por Doorenbos e Kassam (1994), calibrados para ampla faixa de condições climáticas, as correções necessárias para estimar a produtividade potencial da cultura de milho foram realizadas. A correção para respiração de manutenção e crescimento corresponde à matéria seca consumida nos referidos processos ao longo do desenvolvimento. Essa correção depende da temperatura média do ar (T, °C), expressa pela equação 13:

$$CR_{mc} = \gamma_0 + \gamma_1 T + \gamma_2 T m^2 \quad (13)$$

em que  $\gamma_0$ ,  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  se referem aos parâmetros empíricos determinados em análise de regressão ( $\gamma_0 = -0,545$ ;  $\gamma_1 = 0,0786$ ;  $\gamma_2 = -0,0013$ ), segundo Doorenbos e Kassam (1994), e utilizada por Figueredo Junior (2004). A partir daí foi realizada a correção para interceptação luminosa, baseando-se na Lei de Beer-Bouguer-Lambert (OMETTO, 1981), sendo possível estimar a interceptação da radiação solar por uma comunidade de plantas (equação 14), com a correção da radiação solar média absorvida, obtida em função do índice de área foliar médio da cultura durante o ciclo (equação 15):

$$CR_s = 1 - e^{-kIAF_j} \quad (14)$$

$$k_j = d_0 + d_1 \sqrt{IAFcr_j} \quad (15)$$

em que k se refere ao coeficiente de extinção da radiação e  $d_0$  e  $d_1$  aos parâmetros empíricos determinados em análise de regressão ( $d_0 = 0,27697$ ;  $d_1 = -0,06097$ ), segundo Doorenbos e Kassam (1994), e utilizada por Figueredo Junior (2004). A partição de fitomassa destinado para a formação de raízes ( $Aloc\_raiz$ ) foi obtida pela equação 16:

$$Aloc\_raiz = ar_0 + Dr_j * ar_1 + ar_2 * Dr_j^2 \quad (16)$$

em que  $ar_0 = 0,378042696$ ,  $ar_1 = -0,95480297$  e  $ar_2 = 0,580822954$ , segundo Figueredo Júnior (2004).

A partição de fitomassa aérea é dado pela equação 17:

$$Aloc\_part\_aerea = 1 - Aloc\_raiz \quad (17)$$

A produtividade potencial diária ( $PP_j$ , kg ha<sup>-1</sup>) foi dada pela equação 18:

$$PP = \frac{MCH_2O \cdot CR_{mc} \cdot CR_s \cdot Aloc\_part\_aerea}{1 - u} \quad (18)$$

em que u se refere à umidade do grão após a secagem, utilizando-se 13% na secagem, utilizando-se 13% para a produção de grãos e 65% para a produção de silagem (0,13 g.g<sup>-1</sup> ou 0,65 g.g<sup>-1</sup>) respectivamente.

### Produtividade Deplecionada

A produção diária bruta de carboidratos será deplecionada em função da temperatura e por intermédio da quantidade real de água disponível no solo às plantas. A produtividade deplecionada considerou a precipitação ocorrida no período avaliado. No presente caso, utilizou-se a metodologia proposta por Thornthwaite (1948) para calcular a evapotranspiração potencial, ajustada para dados diários, sendo a equação 19:

$$ETp_i = 16 \left( 10 \frac{T_i}{I} \right)^a \cdot \frac{n_i}{N_i} \cdot \frac{ND_i}{30} \quad (19)$$

em que I e a são os parâmetros da equação (e serão estimados na sequência), n é a insolação (h d<sup>-1</sup>), N é o comprimento do dia (h d<sup>-1</sup>), ND é o número de dias do período em questão e  $T_m$  é a temperatura média do i-ésimo período (equação 20).

$$I = \sum_{m=1}^{12} (0,2 T_m)^{1,514} \quad (20)$$

$$a = 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,7912 \times 10^{-2} I + 0,49239 \quad (20)$$

A evapotranspiração da cultura é apresentada por Doorenbos e Kassam (1994), sendo definida como (equação 21):

$$ETc_i = Kc_i \cdot ETp_i \quad (21)$$

em que Kc é o coeficiente de cultura e ETp é a evapotranspiração potencial.

Os valores do coeficiente de cultura são definidos por Doorenbos e Kassam (1994), onde variam em função do desenvolvimento relativo na seguinte

forma: Se  $Dr < 0,24$  então  $Kc = 0,4$ ; se  $0,24 \leq Dr < 0,5$  então  $Kc = 0,8$ ; se  $0,5 \leq Dr < 0,61$  então  $Kc = 1,15$ ; se  $0,61 \leq Dr < 0,74$  então  $Kc = 0,8$ ; e se  $Dr \geq 0,74$ , então  $Kc = 0,5$ .

O balanço hídrico normal segue a sequência apresentada por Thornthwaite e Mather (1955). Deve-se, primeiramente, determinar os valores de negativos acumulados ( $L_i$ ) e do armazenamento (Arm), simultaneamente, da seguinte forma: se a precipitação do dia menos a evapotranspiração potencial forem menor que zero primeiramente deve ser calculado o negativo acumulado, ou seja, os valores acumulados de precipitação menos evapotranspiração e, posteriormente, calcula-se o valor de armazenamento (equação 22):

$$Arm_i = CAD.e^{\left| \frac{L_i}{CAD} \right|} \quad (22)$$

em que CAD é a capacidade de água disponível.

Porém, se  $(P-Etp) \geq 0$  calcula-se primeiro o ARM [ARM = ARM anterior +  $(P-Etp)$ ] e, posteriormente, o  $L_i$  (equação 23):

$$L_i = -CAD.\ln\left(\frac{Arm_i}{CAD}\right) \quad (23)$$

Nessa condição, o  $L_i$  deve ser determinado caso haja um próximo período com  $(P-Etp)$  inferior a zero. Em seguida, deve-se calcular a alteração no armazenamento, o qual será o armazenamento atual menos o armazenamento anterior. Com isso, pode-se calcular a evapotranspiração real (Etr) (equação 24):

$$\begin{aligned} Se(P - Etp) < 0 &\rightarrow ETr = P + |Alt| \\ Se(P - Etp) \geq 0 &\rightarrow ETr = Etp \end{aligned} \quad (24)$$

O coeficiente de sensibilidade da cultura à deficiência hídrica, para a cultura do milho, foi modificado dos valores apresentados por Doorenbos e Kassam (1994), e a partir daí pode-se utilizar as relações entre evapotranspiração real e máxima para determinar a produtividade deplecionada (PD,  $kg\ ha^{-1}$ ) da cultura em função da produtividade potencial (PP,  $kg\ ha^{-1}$ ) (equação 25).

$$PD = PP \left[ 1 - Ky_i \left( 1 - \left( \frac{ETr_i}{ETC_i} \right) \right) \right] \quad (25)$$

Quando o  $Dr \leq 0,24$  o  $Ky$  valerá 0,2, quando o  $Dr$  estiver entre 0,24 e 0,4 o  $Ky$  será 0,4, quando o  $Dr$  estiver entre 0,4 e 0,8 o  $Ky$  equivalerá 0,6, quando o  $Dr$  estiver entre 0,48 e 0,61 o  $Ky$  será 0,8, quando o  $Dr$  estiver entre 0,61 e 0,9 o  $Ky$  valerá 0,9 e quando o  $Dr$  for superior a 0,9 o  $Ky$  será igual a 1.

A partir das produtividades potencial e deplecionada em cada um dos cenários simulados anteriormente estimou-se a quantidade de nitrogênio necessário para as referidas produtividades. Os parâmetros básicos utilizados estão descritos na Tabela 1.

Com base nos parâmetros citados anteriormente estimou-se a quantidade de nitrogênio necessária para a produção de grãos e silagem, com modificações nos modelos propostos por Dourado Neto e Detomini (2005) (equação 26).

$$QN = \frac{PE}{IC.EF} [TPG.TNP.IC + (1-IC)TNOP](1-NS) \quad (26)$$

em que PE é referente à produtividade esperada (grãos ou silagem), IC ao índice de colheita, TPG ao teor de proteína no grão, TNP ao teor de nitrogênio na proteína, TNOP ao teor de nitrogênio em outras partes, NS ao nitrogênio proveniente do solo e EF a eficiência de utilização de nitrogênio pelas plantas.

Logo após foram realizadas estimativas para a semeadura, sendo realizada em 26 de outubro de 2009. Os valores estimados por meio do modelo anteriormente descrito, baseado em dados da literatura, foram comparados com os valores observados a partir da alteração dos parâmetros do modelo anterior, os quais foram obtidos por meio do experimento. As equações e os valores modificados seguem: Na equação 8 foram utilizados os valores de IAF obtidos na Figura 1 para cada genótipo, sendo utilizado o número médio de plantas por metro quadrado de cada genótipo. O índice de colheita para grãos foi substituído, bem como o número de graus-dias informados pelas empresas detentoras das sementes e o teor percentual de nitrogênio exportado (Tabela 2).

**Tabela 1.** Parâmetros utilizados para estimação da quantidade necessária de nitrogênio para a produção de grãos e produção de silagem.

Parâmetros	Grão	Silagem	Fonte
Índice de Colheita	0,50	0,90	Doorenbos e Kassam (1994), Sá (2001)
Teor de Proteína	0,12	0,12	Oliveira et al., 2004
Teor de Nitrogênio na Proteína	0,17	0,17	Dourado Neto e Detomini (2005)
Teor de Nitrogênio em Outras Partes	0,01	0,01	Dourado Neto e Detomini (2005)
Nitrogênio do Solo	0,60	0,60	Figueiredo et al. (2008); Duete et al. (2008); Fernandes et al. (2008)
Eficiência da Utilização do Nitrogênio	0,42	0,57	Figueiredo et al. (2008); Duete et al. (2008); Fernandes et al. (2008)

**Tabela 2.** Parâmetros utilizados para estimação das produtividades e quantidade necessária de nitrogênio para produção de grãos e silagem (Modelo 2).

Genótipos	Índice de Área Foliar (IAF)	GD*	IC/Grão	IC/Silagem	%N Silagem	P <sub>0</sub>
AG30A86	$-3,23165635 + 0,22556689X - 0,00135241X^2$	841	0,53	0,90	0,0195	6,6
AGN20A55	$-3,1299375 + 0,22664613X - 0,00138383X^2$	843	0,54	0,90	0,0207	6,7
CD308	$-3,0695 + 0,22149048X - 0,00140357X^2$	800	0,62	0,90	0,0212	6,6
AG30A91	$-3,2195 + 0,22821295X - 0,00132664X^2$	902	0,58	0,90	0,0234	6,7

\*considerando a emergência das plantas no dia e a pressão atmosférica diária da equação (11). GD: graus-dia; IC: índice de colheita; P<sub>0</sub>: população em número de plantas por m<sup>2</sup>.

As estimativas obtidas pelo modelo realizado com base em dados da literatura são apresentadas como Modelo 1 e as estimativas geradas pelo modelo alternativo proposto, calibrado com dados observados no experimento, correspondem ao Modelo 2. Para avaliar o desempenho dos modelos foram utilizados indicadores estatísticos como o coeficiente de correlação de Pearson ( $\rho$ ) entre os valores observados e os simulados para cada um dos modelos, o índice de concordância de Willmott (ID), que avalia a aproximação e o afastamento dos valores simulados em relação aos observados, cujos valores variam de zero, para nenhuma concordância, a um, para a concordância perfeita (WILLMOTT, 1981), e o índice de desempenho de Camargo ( $c = \rho * ID$ ), o qual se constitui no produto dos dois índices anteriores (CAMARGO; SENTELHAS, 1997) (Tabela 3). A porcentagem de desvio (PD) foi calculada considerando-se a diferença entre os valores medidos e observados, dividindo-se esse valor pelos valores observados e multiplicando-se por 100 para convertê-lo em porcentagem. Porcentagem de desvios negativos indica subestimativa, enquanto que porcentagem de

desvios positivos indica superestimativa. Além disso, o quadrado médio do erro (QME) foi calculado conforme a equação abaixo (27):

$$QME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} * \frac{100}{M} \quad (27)$$

em que P<sub>i</sub> e O<sub>i</sub> se referem às variáveis estudadas simuladas e observadas, respectivamente, N ao número de observações e M a média dos valores observados.

O QME indica a diferença relativa, em %, entre os valores simulados e observados. A simulação é considerada excelente quando QME é menor do que 10%, boa entre 10 e 20%, aceitável entre 20 e 30%, e pobre quando maior do que 30% (JAMIESON et al., 1991). Com esses processos permitiu-se identificar o processo de simulação que mais reproduz os dados observados.

**Tabela 3.** Critérios de interpretação do desempenho dos modelos pelo índice c (adaptado de Camargo e Sentelhas, 1997).

Valor de c	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Moderado
0,51 a 0,60	Fraco
0,41 a 0,50	Muito fraco
≤ 40	Péssimo

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os modelos testados verificou-se que a produção potencial de grãos (Tabela 4) pode alcançar até 25.107,30 kg ha<sup>-1</sup>, assim como a produção deplecionada atingir 12.932,81 kg ha<sup>-1</sup>. As médias de produtividade potencial alcançadas nessas estimativas são similares às observadas no Chile, onde a produtividade em lavouras irrigadas varia de 18.000 a 20.000 kg ha<sup>-1</sup> (USDA, 2011). Bonnacarrère et al. (2007), ao estimarem a produtividade potencial para a região do Rio Grande do Sul, obtiveram valores de até 16.000 kg ha<sup>-1</sup>. No caso da produtividade

deplecionada, comparando os resultados simulados nesse experimento com os obtidos na literatura, observa-se que a produtividade média de grãos em ensaios realizados utilizando tecnologias adequadas no estado do Paraná variou de 9.402 a 12.700 kg ha<sup>-1</sup> (SHIOGA et al., 2011). Dessa forma, os valores gerados por intermédio do modelo são adequados quando comparados aos valores apresentados na realidade. O milho expressa o seu potencial produtivo de acordo com as condições ambientais e manejos aplicados sobre a área. Todavia, percebe-se que se pode produzir quantidades significativas de grãos por área.

**Tabela 4.** Médias de produtividade potencial (PP) e deplecionada (PD), de grãos (kg ha<sup>-1</sup>) e silagem (kg ha<sup>-1</sup>), necessidade de nitrogênio (kg ha<sup>-1</sup> de N) e ciclo (dias) de genótipos de milho determinados experimentalmente e estimados por modelos matemáticos.

Genótipos	Experimento a campo					
	Grãos	N	Ciclo	Silagem	N	Ciclo
AG30A86	10.553,30	297,00	130	19.790	386	130
AGN20A55	10.893,52	313,53	132	20.070	416	132
CD308	10.211,86	282,66	130	16.290	346	130
AG30A91	12.864,09	361,53	134	22.010	516	134
<b>Estimativas – Modelo 1</b>						
<b>AG30A86</b>						
PP	13.247,53	383,55	129	22.430,49	554,47	109
PD	6.934,77	200,78		11.526,46	403,00	
<b>AGN20A55</b>						
PP	13.247,53	383,55	129	22.430,49	554,47	109
PD	6.934,77	200,78		11.526,46	403,00	
<b>CD308</b>						
PP	12.938,44	374,60	126	21.828,51	539,59	106
PD	6.866,67	198,81		11.124,46	388,94	
<b>AG30A91</b>						
PP	13.660,05	395,49	133	23.265,55	575,11	113
PD	7.009,11	202,93		11.836,03	413,82	
<b>Estimativas – Modelo 2</b>						
<b>AG30A86</b>						
PP	20.042,29	558,66	129	32.301,48	788,22	109
PD	10.496,79	292,59		16.884,66	595,35	
<b>AGN20A55</b>						
PP	20.547,63	565,91	129	32.881,71	823,39	109
PD	10.737,39	295,72		17.129,08	633,40	
<b>CD308</b>						
PP	20.147,44	509,04	126	28.280,51	680,57	106
PD	10.596,33	267,72		14.624,09	552,36	
<b>AG30A91</b>						
PP	25.107,30	660,95	133	37.287,80	890,17	113
PD	12.932,81	340,46		19.070,69	681,88	

Em relação à produção de silagem, verifica-se que o potencial de produção de fitomassa seca é de até 37.287,80 kg ha<sup>-1</sup>, enquanto que a produção deplecionada atinge o máximo de 19.070,69 kg ha<sup>-1</sup>. A quantidade estimada de nitrogênio necessária para a cultura do milho e para a obtenção da produtividade potencial foi elevada, chegando a 660,95 kg ha<sup>-1</sup> para produção de grãos e 890,17 kg ha<sup>-1</sup> para a produção de silagem. No entanto, quando se considera a produtividade deplecionada a necessidade de N pode variar de 292,59 a 340,46 kg ha<sup>-1</sup> para a produção de grãos e 595,35 a 681,88 kg ha<sup>-1</sup> para produção de silagem. Em termos gerais, as recomendações de nitrogênio geradas pelos modelos para as produtividades potenciais e deplecionadas tanto de grãos quanto de silagem são destoantes em relação ao praticado atualmente. Contudo, as produtividades estimadas são superiores às verificadas em experimentos e produções comerciais. Segundo Coelho (2007), a quantidade média de nitrogênio utilizada em lavouras comerciais de milho, no Brasil, é de 60 kg ha<sup>-1</sup>, sendo que para a obtenção de altas produtividades a recomendação técnica é aplicar 60 a 100 kg ha<sup>-1</sup> em cobertura, nos cultivos de sequeiro, e 120 a 160 kg ha<sup>-1</sup>, em áreas irrigadas (CANTARELLA et al., 1997, SOUZA et al., 2003, AMARAL FILHO et al., 2005, COELHO 2007). Todavia, o que comumente se observa é que os agricultores que normalmente obtêm altas produtividades de milho utilizam elevadas doses de nitrogênio, geralmente superiores aos níveis recomendados em suas regiões pelos órgãos oficiais de pesquisa e extensão (COELHO et al., 2004). Para exemplificar, Pavinato et al. (2008) mencionam a obtenção de produtividades de grãos superiores a 12.000 kg ha<sup>-1</sup> com a aplicação de 289 kg ha<sup>-1</sup> de N. Similarmente, Ohland et al. (2005) evidenciaram que para alcançar o máximo potencial produtivo a cultura necessitou de quantidades acima de 200 kg ha<sup>-1</sup> de N. Da mesma forma, para a produção de silagem, alguns autores mencionam que a extração de nitrogênio pode chegar a 413 kg ha<sup>-1</sup> para produções de aproximadamente 19.000 kg ha<sup>-1</sup> (MARTIN et al., 2010).

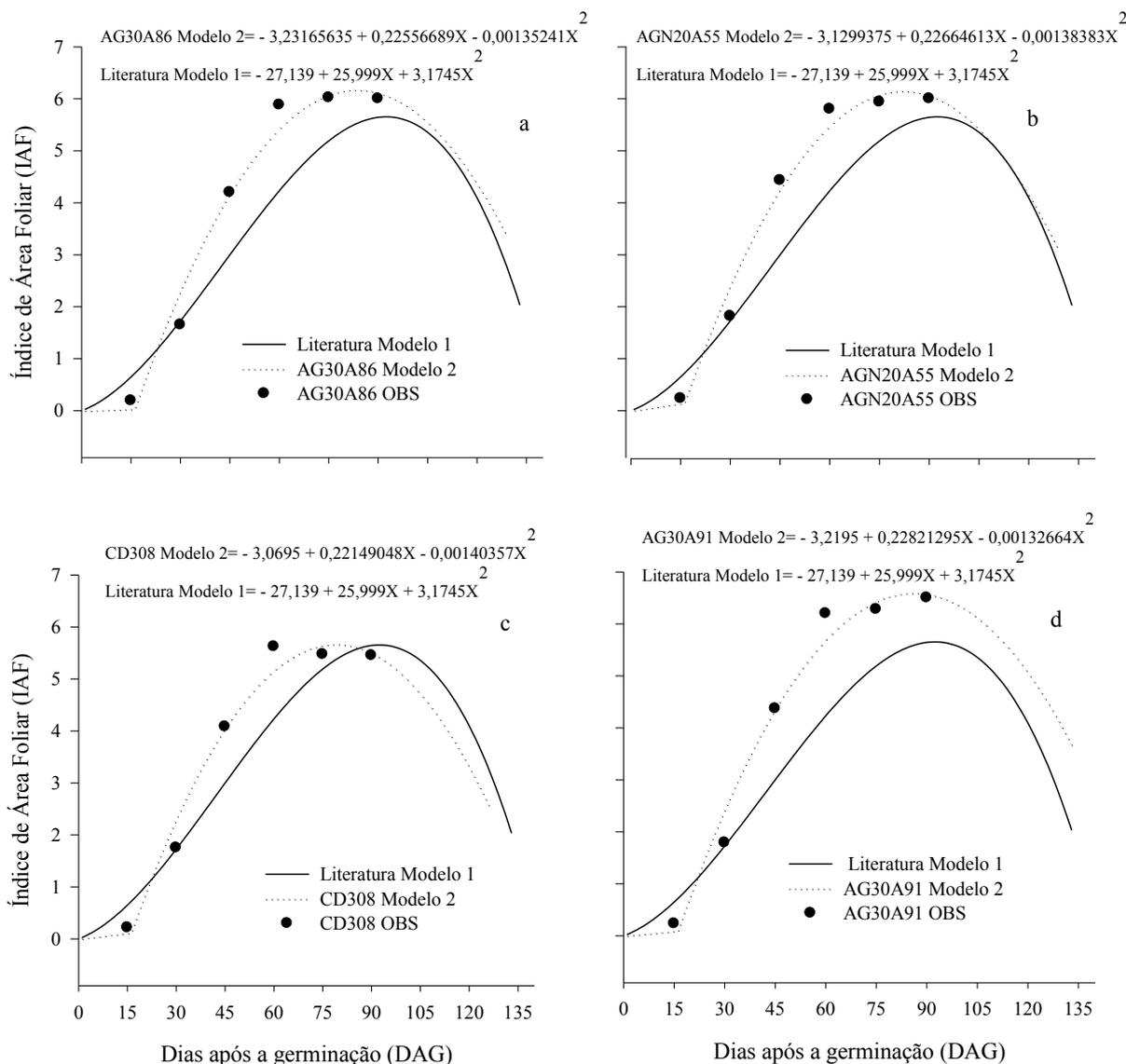
O maior índice de área foliar obtido pelo genótipo AG30A91 (Figura 1) refletiu em maiores estimativas de produtividades potencial e deplecionada de grãos e matéria seca de silagem (Tabela 4). Da mesma forma, as menores produtividades estimadas pelo modelo 1 podem ser atribuídas aos menores índices de área foliar, utilizados nas simulações de assimilação de carboidratos. Essas observações podem ser confirmadas pelos dados obtidos a campo, onde os genótipos que apresentaram menor índice de

área foliar durante o seu ciclo de desenvolvimento tiveram uma área fotossinteticamente ativa inferior, o que resultou em uma menor produção de fotoassimilados e, conseqüentemente, menor produtividade de grãos e silagem, evidenciando a importância dessa variável na determinação da quantidade de carboidratos assimilados e produção final da cultura.

O índice de área foliar máximo observado neste trabalho para os híbridos avaliados foi atingido aos 90 dias após a germinação, com valores de 6,0, 6,02, 5,45 e 6,51 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> para os genótipos AG30A86, AGN20A55, CD308 e AGN20A91, respectivamente. De maneira geral, os valores encontrados no experimento durante praticamente todo o ciclo de desenvolvimento da cultura estiveram acima dos índices observados nas estimativas realizadas com base nos dados da literatura (Figura 1).

Em trabalho realizado por Alvim et al. (2010), objetivando quantificar a área foliar em milho e avaliar as conseqüências de diferentes níveis de desfolha nos componentes de produção, o valor máximo de IAF encontrado foi de 4,4 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>. Quando esse índice foi reduzido para 2,7 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> o rendimento de grãos foi aproximadamente 20 % inferior. Conforme mencionado por Favarin et al. (2002), a área foliar é um parâmetro indicativo de produtividade, já que o processo fotossintético depende da interceptação de energia luminosa e sua conversão em energia química. Assim sendo, a superfície foliar de uma planta é a base do rendimento potencial da cultura.

No milho, quanto maior o número de folhas maior o IAF. Porém, as folhas inferiores recebem uma menor radiação direta incidente, sendo desenvolvidas sob condições de baixa luminosidade, e têm menor capacidade fotossintética. Isso pode ter mascarado os resultados, pois ao se disponibilizar maiores quantidades de nitrogênio para a cultura as folhas (inferiores) menos eficientes fotossinteticamente permaneceram verdes por mais tempo, uma vez que a nutrição adequada, especialmente a nitrogenada, propicia às plantas melhores condições de crescimento e desenvolvimento do tecido foliar, reduzindo os efeitos da deficiência deste nutriente sobre a senescência (WOLSCHICK et al., 2003). No presente estudo, foram consideradas as folhas verdes para a estimativa do IAF, fazendo com que haja uma superestimativa do IAF das plantas. Porém, esses valores podem ser substituídos pelo valor de IAF, considerado ideal para a cultura, ajustando os valores de produtividade e necessidade de nitrogênio para patamares mais adequados, sem que haja prejuízo no modelo matemático apresentado.



**Figura 1.** Índice de Área Foliar (IAF) observados e estimados pelos modelo 1 e modelo 2 para os genótipos AG30A86 (a), AGN20A55 (b), CD308 (c) e AG30A91 (d).

O elevado coeficiente de correlação (0,98) e o índice de concordância (0,98) encontrado entre os valores simulados e observados associado ao índice de desempenho de 0,96 e o baixo valor atribuído ao QME (1,90) demonstram a habilidade do modelo 2 em simular a produtividade de grãos da cultura. O mesmo não se pode dizer do modelo 1, onde o índice de concordância encontrado foi de 0,01 e os desvios percentuais obtidos, entre -32,75 e -45,51, evidenciam a tendência deste modelo em subestimar as produtividades da cultura.

Da mesma forma, os valores do índice de concordância, coeficiente de correlação, quadrado médio do erro (QME) e índice de desempenho (c) demonstram boa associação entre os dados estimados e os observados para a simulação da necessidade de nitrogênio da cultura destinada à produção de grãos. De acordo com as estimativas realizadas, a quantidade média de nitrogênio exigida pela cultura seria de

aproximadamente 300 kg ha<sup>-1</sup> para produtividades, em torno de 11.190,78 kg ha<sup>-1</sup>. Em trabalho realizado por Araújo et al. (2004), a aplicação de 240 kg ha<sup>-1</sup> de N proporcionou uma produtividade de 11.203,3 kg ha<sup>-1</sup>. Similarmente, Cantarella (1993) menciona que em várias partes do mundo a recomendação de nitrogênio para a cultura do milho, objetivando altas produtividades (mais de 9.000 kg ha<sup>-1</sup>), varia de 150 a 300 kg ha<sup>-1</sup>.

Em relação ao ciclo, infere-se que os valores verificados e simulados nos dias desde a sementeira até a maturação fisiológica foram semelhantes para ambos os modelos. Os índices estatísticos Id (0,89), r (0,97) e c (0,87) foram elevados e juntamente com os baixos valores de desvios percentuais (0 a -2,32) e QME (1,27) expressam a eficiência e a precisão de ambos os modelos na estimativa do ciclo da cultura (Tabela 5).

**Tabela 5.** Produção de grãos média, necessidade de nitrogênio e ciclo da cultura usadas na avaliação dos Modelo nº 1 (M1) e Modelo nº 2 (M2), respectivos quadrado médio do erro (QME), porcentagem de desvio (PD), índice de concordância de Willmott (ID), correlação de Pearson ( $\rho$ ) e índice de desempenho de Camargo (C).

Genótipos	Produção de Grãos (kg ha <sup>-1</sup> )			PD		QME		ID		$\rho$		C	
	OBS	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
AG30A86	10.553,3	6.934,77	10.496,7	34,28	0,53								
AGN20A55	10.893,5	6.934,77	10.737,3	36,34	1,43	38,7	1,90	0,01	0,98	0,92	0,98	0,00	0,96
CD308	10.211,8	6.866,67	10.596,3	32,75	3,76								
AG30A91	12.864,0	7.009,11	12.932,8	45,51	0,53								
	Nitrogênio (kg ha <sup>-1</sup> )												
AG30A86	279,00	200,78	292,59	32,28	1,31								
AGN20A55	313,53	200,78	295,72	35,96	5,68	37,07	5,04	0,26	0,94	0,94	0,98	0,24	0,93
CD308	282,66	198,81	267,72	29,66	5,28								
AG30A91	361,53	202,93	340,46	43,86	5,82								
	Ciclo (dias)												
AG30A86	130	129	129	0,76	0,76								
AGN20A55	132	129	129	0,76	0,76	1,27	1,27	0,89	0,89	0,97	0,97	0,87	0,87
CD308	130	126	126	2,32	2,32								
AG30A91	134	133	133	0,00	0,00								

OBS: produção de grãos observada.

Em relação às estimativas da produtividade de silagem, a correlação entre os parâmetros e as estatísticas dos dados simulados pelo modelo nº 2 é elevada (Tabela 6). O quadrado médio do erro (13,66)

caracteriza uma baixa diferença relativa entre os valores simulados e observados, sendo o índice de desempenho classificado como moderado.

**Tabela 6.** Médias de produtividade, necessidade de nitrogênio e ciclo da cultura para produção de silagem usadas na avaliação do Modelo nº 1 e Modelo nº 2, respectivos quadrado médio do erro (QME), porcentagem de desvio (PD), índice de concordância de Willmott (ID), correlação de Pearson ( $\rho$ ) e índice de desempenho de Camargo (C).

Genótipos	Produção de Silagem (kg ha <sup>-1</sup> )			PD		QME		ID		$\rho$		C	
	OBS	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
AG30A86	19.790	11.526,46	16.884,66	41,76	14,68								
AGN20A55	20.070	11.526,46	17.129,08	42,57	14,65	42,16	13,66	0,02	0,64	0,99	0,99	0,03	0,64
CD308	16.290	11.124,46	14.624,09	31,71	10,23								
AG30A91	22.010	11.836,03	19.070,69	46,22	13,35								
	Nitrogênio (kg ha <sup>-1</sup> )												
AG30A86	386,00	403,00	595,35	4,40	54,23								
AGN20A55	416,00	403,00	633,40	3,12	52,25	13,56	48,25	0,40	0,23	0,93	0,97	0,36	0,22
CD308	346,00	388,94	552,36	12,41	59,64								
AG30A91	516,00	413,82	681,88	19,80	32,14								
	Ciclo (dias)												
AG30A86	108	109	109	0,93	0,93								
AGN20A55	108	109	109	0,93	0,93	1,53	1,53	0,84	0,84	0,99	0,99	0,83	0,83
CD308	106	106	106	0,00	0,00								
AG30A91	110	113	113	2,73	2,73								

Quanto à simulação da necessidade de nitrogênio na produção de silagem, infere-se que os modelos propostos não foram suficientemente eficientes e precisos na estimativa das doses para esse nutriente, sendo obtidos baixos índices de desempenho e

exatidão para ambos os modelos testados.

As estimativas da necessidade de nitrogênio, em geral, foram superiores às quantidades observadas desse nutriente nos tecidos da planta. Em média, os teores de N extraídos pela silagem de milho foram

de aproximadamente 416 kg ha<sup>-1</sup>, enquanto que as exigências da cultura estimadas pelo modelo 2 ficaram em torno de 615,75 kg ha<sup>-1</sup>, considerando-se a obtenção de produtividades médias de 19.540 e 16.927,13 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Dessa forma, as elevadas quantidades de N estimadas sugerem que os parâmetros utilizados na simulação das necessidades de N para produção de silagem estão superestimando as reais necessidades da planta. Nesse sentido, uma provável subestimação da eficiência de utilização de nitrogênio e da capacidade de suprimento de nutrientes pelo solo poderia estar contribuindo para aumentar as estimativas e reduzir a eficiência dos modelos testados. Futuros trabalhos precisam esclarecer essas questões, no sentido de aperfeiçoar os parâmetros do sistema. Além disso, deve-se considerar que as plantas possuem diferentes capacidades de extração e remobilização do nitrogênio na cultura do milho, assim como é destacado por Borges et al. (2006).

O ciclo da cultura, desde a emergência até a ponto de ensilagem, e os valores simulados para essa fase foram similares em magnitude. Um elevado índice de concordância (0,84) foi encontrado entre os valores simulados e observados, assim como o coeficiente de correlação obtido (0,99) é considerado alto e o índice de desempenho (0,83) classificado como muito bom, de acordo com a Tabela 3. Da mesma forma, o QME foi baixo (1,53), demonstrando a habilidade dos modelos em simular a fenologia da cultura.

Os resultados obtidos neste trabalho evidenciam que o modelo 2 pode ser utilizado na estimativa da produtividade de grãos e silagem, assim como na simulação da extração de nitrogênio pela produção de grãos, sendo ambos os modelos eficientes na simulação do ciclo da cultura. O melhor desempenho do modelo 2 em relação ao modelo 1 pode ser atribuído em partes à determinação exata do número de graus-dias para o florescimento e o índice de área foliar, pois 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 CO<sub>2</sub>, melhorando o desempenho do modelo em estimar o acúmulo de matéria seca na planta e, conseqüentemente, o rendimento de grãos da cultura.

## CONCLUSÕES

O modelo 2, calibrado com os dados experimentais, pode ser utilizado na simulação das produtividades de grãos e estimar as exigências em nitrogênio na cultura do milho. No entanto, necessita de melhores ajustes para sua utilização na estimativa das necessidades de nitrogênio para a produção de silagem.

## REFERÊNCIAS

ALVIM, K. R. de T. et al. Quantificação da área foliar e efeito da desfolha em componentes de produção de milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 5, p. 1017-1022, 2010.

AMARAL FILHO, J. P. R. et al. Espaçamento, densidade populacional e adubação nitrogenada na cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 467-473, 2005.

ARAÚJO, L. A. N.; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. Adubação nitrogenada na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 8, p. 771-777, 2004.

ASSIS, J. P. et al. Dados climáticos simulados e produtividade potencial do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 4, n. 5, p. 731-737, 2006.

ASSUNÇÃO, H. F. **Relações entre radiação fotosinteticamente ativa e a radiação solar global em Piracicaba, SP**. 1994. 41 f. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

BHERING, S. B.; SANTOS, H. G. **Mapa de solos do Estado do Paraná: legenda atualizada**. Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA/IAPAR, 2008. 74 p.

BONNECARRÈRE, R. A. G. et al. Estimativa das produtividades potencial e deplecionada da cultura de milho no Estado do Rio Grande do Sul em função das condições climáticas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 15, n. 3, p. 280-288, 2007.

BORGES, E. A. et al. Acúmulo e remobilização de nitrogênio em variedades de milho. **Caatinga**, Mossoró, v. 19, p. 278-286, 2006.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CANTARELLA, H. **Calagem e adubação do milho**. In: BÜLL, L.T.; CANTARELLA, H. (Ed.). Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Potafos, 1993. p.147-185.

CANTARELLA, H. et al. **Recomendações técnicas de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1997. p. 45-57. (Boletim técnico, 100).

COELLHO, A. M. **Manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2007. 11 p. (Embrapa Milho e Sorgo).

Circular Técnica, 96).

COELHO, A. M.; CRUZ, J. C.; FILHO, I. A. P. **Desafios para obtenção de altas produtividades de milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2004. (Comunicado Técnico, 112).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Trad. de GHEYI, H. Campina Grande, PB: UFPB, 1994. 306p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

DOURADO NETO, D.; DETOMINI, E. R. Modelo de adubação nitrogenada aplicável a rebrota de pastagens submetidas a sistemas de desfolha intermitente. **Pasturas Tropicais**, Cali, v. 27, n. 2, p. 18-25, 2005.

DOURADO NETO, D. et al. Modelo para estimação da produtividade de grãos deplecionada com base no balanço hídrico do solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 359-367, 2004.

DOURADO NETO, D. et al. Modelos matemáticos fisiológicos para estimar matéria seca da parte aérea e produtividade de grãos de milho. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 11, n. 4, p. 409-418, 2005.

DUETE, R. R. C. et al. Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (15N) pelo milho em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 161-171, 2008.

FAVARIN, J. L. et al. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 769-773, 2002.

FERNANDES, F. C. S.; LIBARDI, P. L.; TRIVELIN, P. C. O. Parcelamento da adubação nitrogenada na cultura do milho e utilização do N residual pela sucessão aveia preta-milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 1138-1141, 2008.

FIGUEIREDO JÚNIOR, L. G. M. et al. Modelo para estimativa do índice de área foliar da cultura de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 4, n. 1, p. 8-13, 2005.

FIGUEIREDO, C. C. et al. **Eficiência de utilização de nitrogênio no milho em solo sob sistemas de manejo no cerrado**. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SAVANAS TROPICAIS. 2008, p. 1-6.

FIGUEREDO JÚNIOR, L. G. M. **Modelo para estimativa de produtividade da cultura de milho no estado de São Paulo**. 2004. 69 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Área de concentração em Irrigação e

Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

HEEMST, H. D. J. Physiological principles. In: VAN KEULEN, H.; WOLF, J. **Modeling of agricultural production: Weather, soils and crops**. Wageningen: Pudoc, 1986. p. 13-26.

JAMIESON, P. D.; PORTER, J. R.; WILSON, D. R. A test of the computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zeland. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 27, p. 337-350, 1991.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. Curitiba: Banco do Desenvolvimento do Paraná, 1968. 350 p.

MANFRON, P. A. Modelo do índice de área foliar da cultura do milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 333-342, 2003.

MARTIN, T. N.; PAVINATO, P. S. Modelo determinístico para adubação nitrogenada na cultura do milho para grãos e silagem. In: MARTIN, T. N. et al. (Eds.). **Sistemas de Produção Agropecuária**, Piracicaba, 2010. p. 45-69.

OHLAND, R. A. A. et al. Culturas de cobertura do solo e adubação nitrogenada no milho em plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 3, p. 538-544, 2005.

OLIVEIRA, J. P. et al. Qualidade física do grão em populações de milho de alta qualidade protéica e seus cruzamentos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 4, p. 233-241, 2004.

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

PAVINATO, P. S. et al. Nitrogênio e potássio em milho irrigado: análise técnica e econômica da fertilização. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 358-364, 2008.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas**. Piracicaba: Agropecuária, 2002. 477 p.

SÁ, M. **Aspectos morfológicos e fisiológicos de cultivares modernas e primitivas de milho**. Lavras, 2001. 54 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

SHIOGA, P. S. et al. **Avaliação estadual de cultivos de milho safra 2010/2011**. Londrina: Instituto agrônomo do Paraná (IAPAR), 2011. (Boletim técnico, 73).

SOUZA, L. C. F. et al. Culturas antecessoras e adubação nitrogenada na produtividade de milho em plantio direto irrigado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 3, n. 2, p. 55-62, 2003.

THORNTHWAITE, C. W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, London, v. 38., n. 1, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W., MATHER, R. J. **The water Balance**. New Jersey: Laboratory of Climatology, v. 8, 1955. 104 p. (Publication in Climatology).

TOMÉ JUNIOR, J. B. **Uma nova abordagem nas recomendações de adubação**. 2004. 209 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Programa de Pós Graduação em Solos e nutrição de plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

USDA - **United States Department of Agriculture**. Disponível em: <[www.usdabrazil.org.br](http://www.usdabrazil.org.br)>. Acesso em: 13 de outubro de 2011.

VILLA NOVA, N. A. et al. **Estimativa de graus-dia acumulados acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas máximas e mínimas**. São Paulo: USP, 1972. (Caderno de ciências da terra, 30).

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Delaware, v. 2, n.2, p. 184-194, 1981.

WOLSCHICK, D. et al. Adubação nitrogenada na cultura do milho no sistema plantio direto em ano com precipitação pluvial normal e com 'El Niño'. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 461-468, 2003.