

Estimativa das produtividades potencial e deplecionada da cultura de milho no Estado do Rio Grande do Sul em função das condições climáticas

Estimating the potential and depleted corn crop yields in the State of 'Rio Grande do Sul', Brazil, in function of climatic conditions

Reinaldo Antonio Garcia Bonnacarrère¹, Durval Dourado Neto², Thomas Newton Martin^{3*}, Antonio Roberto Pereira⁴ e Paulo Augusto Manfron⁵

Resumo: Com o objetivo de avaliar os efeitos do clima sobre a produtividade da cultura de milho, adaptou-se o modelo da Zona Agroecológica, apresentado por De Wit (1965) para a estimativa da produtividade potencial de culturas, utilizando-se os valores médios (dados decendiais) de temperatura do ar, insolação e chuva de dezesseis estações agrometeorológicas do estado do Rio Grande do Sul. A produtividade deplecionada foi determinada baseada no balanço hídrico sequencial e na sensibilidade da cultura à deficiência hídrica. Em função dos resultados obtidos, e em comparação com dados de literatura, concluiu-se que a adaptação realizada ao modelo da Zona Agroecológica permite verificar os efeitos do clima (época e locais) na produtividade potencial e deplecionada da cultura de milho no estado do Rio Grande do Sul.

Palavras-chaves: modelagem em agricultura, planejamento regional, deficiência hídrica

Abstract: With the purpose of evaluating the weather effects on the corn crop yield, the Agroecological Zone model, proposed by De WIT (1965) for estimating crop potential yield, was adapted using mean values (decennial data) of air temperature, insolation and rainfall in sixteen agrometeorological stations of the state of 'Rio Grande do Sul', Brazil. The depleted yield was computed based on the sequential water balance and the crop water deficit sensitivity index. The results demonstrated that the adapted model was able to estimate potential and depleted corn yield for the State of 'Rio Grande do Sul', Brazil.

Keywords: crop modeling, regional planning, water deficit

Introdução

Em função do valor nutritivo e das altas produtividades alcançadas, a cultura de milho (*Zea mays* L.) é um dos cereais mais cultivados no Brasil e no mundo, assumindo grande importância social e econômica. Para o Estado do Rio Grande do Sul, a cultura de milho possui a segunda maior área cultivada e a terceira maior produção. A deficiência hídrica é o principal fator que influencia a produtividade (MATZENAUER & FONTANA, 1987; MATZENAUER et al., 1995).

O consumo de água da cultura de milho no

estado do Rio Grande do Sul foi determinado por MATZENAUER et al. (1995) para vários locais e anos. Os autores concluíram que a deficiência hídrica é a variável mais eficiente para indicar as variações de produtividade de grãos de milho entre épocas de semeadura, anos e locais no estado.

Estudos baseados na modelagem de cultura são dinâmicos e muito importantes para o planejamento e gerenciamento regional, devido à redução dos custos de pesquisas a campo, ao direcionamento da pesquisa e à melhoria do entendimento do conhecimento.

¹ Doutor. Pesquisador. Departamento de Pesquisa, BASF. Santo Antônio da Posse, SP. reinaldo-antonio.garcia@basf.com.

² Professor Titular. Departamento de Produção Vegetal, Esalq, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP. dourado@esalq.usp.br.

³ Prof. Dr. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. *Autor correspondente: thomas.martin@hotmail.com.

⁴ Professor Titular. Departamento de Ciências Exatas, Esalq, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP. perinho@gmail.com.

⁵ Professor Titular. Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. manfron@smail.ufsm.br.

Modelo é aquilo que serve de referência ou é dado para ser reproduzido. Dentre os diversos pesquisadores da área de modelagem que se propuseram a definir o que é um modelo, REYNOLDS (1979) definiu como sendo uma equação ou conjunto de equações que representa um sistema real. A utilização da computação na formulação de modelos para simulação do desenvolvimento de culturas e estimativas de produtividade surgiu por volta da década de 70, quando sistemas de análise e computadores surgiram como novas ferramentas de trabalho e análise para os pesquisadores (De WIT & GOUDRIAAN, 1974).

Atualmente, o conhecimento interdisciplinar possibilita simulações acuradas da dinâmica do crescimento de culturas e de sistemas agrícolas (JAME & CUTFORTH, 1996). Normalmente, para se agregar todas estas áreas do conhecimento, os modelos são subdivididos (BOOTE et al., 1996). O uso de modelos de simulação de culturas na pesquisa tem aumentado significativamente, devido à melhoria de técnicas de modelagem e da maior capacidade dos computadores na realização de cálculos (HANKS & RITCHIE, 1991; VRIES et al., 1991). Apesar disso, a modelagem está ainda em estágio inicial de desenvolvimento, uma vez que muitos modelos simulam apenas os principais fatores que afetam as culturas, como por exemplo, clima, água, disponibilidade de nitrogênio no solo e carbono para a fotossíntese. Avanços na modelagem poderão incluir novos componentes como efeitos do preparo do solo, pragas, doenças, plantas daninhas, salinidade, excesso de água, entre outros (JAME & CUTFORTH, 1996).

Os principais aspectos da modelagem de crescimento das culturas foram definidos e iniciados por intermédio dos estudos de De WIT (1965). Como esse autor foi um dos principais precursores dessa técnica, muitas relações e equações por ele apresentadas são empíricas. Devido a isso, outros autores estudam relações que contribuem para o aperfeiçoamento de modelos existentes de modo a torná-los mais utilizáveis. Dentre as contribuições de De Wit, o modelo da zona agroecológica (De WIT, 1965) permite o aumento do conhecimento científico por intermédio das relações entre causas e efeitos dos processos químicos, físicos e biológicos

que ocorrem entre as plantas e o ambiente, possuindo vantagens em relação à métodos que são essencialmente práticos e se baseiam somente em análises de regressão.

Um dos modelos mais conhecidos na atualidade é o modelo *CERES-maize* (*Crop Environment Resource Synthesis*) (JONES & KINIRY, 1986). Trata-se de um modelo determinístico, onde se realiza o cálculo diário dos diversos parâmetros de crescimento e desenvolvimento da planta, sendo que o modelo quantifica os efeitos independentes e interativos do genótipo, clima, atributos do solo e práticas de manejo do cultivo no crescimento e produção de um genótipo específico de milho, assim como o balanço hídrico e a dinâmica de nitrogênio (no solo) durante o ciclo da cultura. Esse modelo permite determinar a produtividade potencial de milho e, posteriormente, a produtividade deplecionada para as regiões de interesse. As adaptações utilizadas se referem às novas equações para estimar área foliar e coeficiente de depleção da produtividade potencial da cultura de milho. A grande diferença entre o modelo *CERES-maize* e o modelo utilizado é a contemplação da variação temporal da área foliar em função do desenvolvimento relativo da cultura (o que permite a extrapolação de sua utilização para outras localidades e outras épocas de semeadura), considerando a correção referente ao índice de área foliar.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar os efeitos do clima sobre as produtividades potencial e deplecionada da cultura de milho no Estado do Rio Grande do Sul por intermédio do modelo da Zona Agroecológica (De WIT, 1965).

Material e Métodos

Foram utilizados os valores médios de temperatura do ar, insolação, radiação solar e chuva, referentes a dezesseis municípios do Estado do Rio Grande do Sul, obtidos junto a FEPAGRO/RS (Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária, Rio Grande do Sul) e ao INMET/RS (Instituto Nacional de Meteorologia, Rio Grande do Sul). As estações de coleta dos dados estão localizadas nos seguintes municípios (apresentadas com a latitude - Sul; longitude - Oeste; e altitude - m, respectivamente):

(1) Cruz Alta (28°38'21"; 53°36'34"; 473), (2) Erechim (27°37'46"; 52°16'33"; 760), (3) Iraí, (27°11'45"; 53°14'01"; 227), (4) Júlio de Castilhos (29°13'26"; 53°40'45"; 514), (5) Passo Fundo (28°15'41"; 52°24'45"; 709), (6) Santa Maria (29°41'25"; 53°48'42"; 95), (7) Santa Rosa (27°51'50"; 54°29'03"; 273), (8) São Luiz (28°23'53"; 54°58'18"; 254), (9) Taquari (29°48'15"; 51°49'30"; 76), (10) Vacaria (28°30'09"; 50°56'12"; 955), (11) Veranópolis (28°56'14"; 51°33'11"; 705), (12) Caxias do Sul, (29°10'25"; 51°12'21"; 740), (13) Maquiné (29°40'; 50°13'; 32), (14) São Borja (28°39'44"; 56°00'15"; 96), (15) São Gabriel (30°20'; 54°19'; 124) e (16) Uruguaiana (29°45'; 57°05'; 74).

Baseado nas relações entre os elementos climáticos e a conversão de energia solar que resulta na produção de fitomassa seca, utilizou-se o modelo de De WIT (1965) modificado para estimar a produtividade da cultura de milho, conforme equações a seguir.

Para o cálculo dos fatores de correção da temperatura, tem-se que (De WIT, 1965):

$$cTn_j = n_0 + n_1.T_j + n_2.T_j^2 \quad (1)$$

$$cTc_j = c_0 + c_1.T_j + c_2.T_j^2 \quad (2)$$

em que n_0 , n_1 , n_2 , c_0 , c_1 e c_2 se referem aos parâmetros empíricos, sendo, (i) $n_0 = -4,16$; $n_1 = 0,4325^\circ\text{C}^{-1}$; $n_2 = -0,00725^\circ\text{C}^{-2}$; $c_0 = -9,32$; $c_1 = 0,865^\circ\text{C}^{-1}$ e $c_2 = -0,0145^\circ\text{C}^{-2}$ (se a temperatura for superior a $16,5^\circ\text{C}$) e (ii) $n_0 = -1,064$; $n_1 = 0,173^\circ\text{C}^{-1}$; $n_2 = -0,0029^\circ\text{C}^{-2}$; $c_0 = -4,16$; $c_1 = 0,4325^\circ\text{C}^{-1}$ e $c_2 = -0,00725^\circ\text{C}^{-2}$ (se a temperatura for inferior ou igual a $16,5^\circ\text{C}$).

A insolação média em determinado período (n_j , h.dia⁻¹) pode assim ser calculada:

$$n_j = \frac{\sum_{y=1}^h (n_{\min j,y} + n_{\max j,y})}{2.h} \quad (3)$$

em que n_{\min} , e n_{\max} , se referem aos valores mínimo e máximo, respectivamente, de insolação (h.dia⁻¹) no dia mediano do j-ésimo decêndio e h se refere ao número de anos da série histórica.

Com base nos dados obtidos por FIGUEREDO JÚNIOR (1994), o índice de área foliar (IAF_j , m².m⁻²) pode ser calculado em função do desenvolvimento relativo (Dr_j) da cultura no j-ésimo decêndio:

$$IAF_j = \alpha_0 Dr_j^3 + \alpha_1.Dr_j^2 + \alpha_2.Dr_j \quad (4)$$

em que α_0 , α_1 e α_2 se referem aos parâmetros empíricos determinados por intermédio de análise de regressão, sendo $\alpha_0 = -27,139 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$; $\alpha_1 = 25,999 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$ e $\alpha_2 = 3,1745 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$.

A correção referente ao índice de área foliar ($cIAF$) pode ser calculada pela expressão:

$$cIAF_j = b_0 + b_1.IAF_j - b_2.IAF_j^2; \text{ se } 0 \leq IAF_j \leq 5 \quad (5)$$

em que b_0 , b_1 e b_2 se referem aos parâmetros empíricos, sendo $b_0 = 0,0093$; $b_1 = 0,185 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$ e $b_2 = 0,0175 \text{ m}^4.\text{m}^{-4}$.

Quanto a correção para respiração de manutenção e de crescimento, a matéria seca consumida nesses processos ao longo do ciclo da cultura depende principalmente da temperatura média do ar (T , °C), sendo que a correção (cR), utilizada para estimar o saldo relativo (relação entre fotossíntese líquida e a fotossíntese bruta), pode ser expressa por (De WIT, 1965):

$$cR = 0,5; \text{ se } T_j > 20^\circ\text{C} \quad (6)$$

$$cR = 0,6; \text{ se } T_j \leq 20^\circ\text{C} \quad (7)$$

A produtividade potencial bruta diária pode ser calculada por intermédio das seguintes equações (De WIT, 1965):

$$PPBc_j = (107,2 + 0,36.Q_0). \frac{n_j}{H_j}.cTc_j.cIAF_j.cR_j.D_j \quad (8)$$

$$PPBn_j = (31,7 + 0,219.Q_0). \left(1 - \frac{n_j}{H_j}\right).cTn_j.cIAF_j.cR_j.D_j \quad (9)$$

em que $PPBc_j$ e $PPBn_j$ se referem à produtividade potencial bruta diária (kg.ha⁻¹) correspondente aos dias de céu limpo e aos dias nublados, respectivamente; considerando a média do decêndio, Q_0 à radiação extraterrestre (cal.cm⁻².min⁻¹); n_j à insolação (h.dia⁻¹); H_j ao fotoperíodo (h.dia⁻¹); cTc_j e cTn_j aos fatores de correção correspondente aos dias de céu limpo e dias nublados, respectivamente; $cIAF_j$ à correção referente ao índice de área foliar; cR_j à correção referente à respiração no dia mediano do j-ésimo decêndio e D_j à duração (dias) do j-ésimo

decêndio: (i) meses de janeiro, março, maio, julho, agosto, outubro de dezembro: (1) primeiro decêndio: 10 dias; (2) segundo decêndio: 10 dias e (3) terceiro decêndio: 11 dias; (ii) mês de fevereiro: (1) primeiro decêndio: 10 dias; (2) segundo decêndio: 10 dias e (3) terceiro decêndio: 8 dias; (iii) meses de abril, junho, setembro e novembro: (1) primeiro decêndio: 10 dias; (2) segundo decêndio: 10 dias e (3) terceiro decêndio: 10 dias.

Com base no modelo de De WIT (1965), concebido para estimar a produtividade potencial da cultura de milho por intermédio da energia disponível no local considerado, tem-se que:

$$PPB_j = PPBc_j + PPBn_j \quad (10)$$

$$PPBac_f = \sum_{j=1}^f PPB_j \quad (11)$$

em que PPB_j se refere à produtividade potencial ($kg.ha^{-1}$) que ocorre no j -ésimo decêndio; e $PPBac_f$ à produtividade potencial bruta acumulada até o ponto de maturidade fisiológica ($kg.ha^{-1}$) da cultura de milho.

O índice de colheita se refere à fração de matéria seca do órgão de interesse colhido (normalmente grãos) em relação à matéria seca total elaborada, a qual é obtida em função de dados experimentais. De acordo com DOORENBOS & KASSAM (1994), LIMA (1995), GADIOLI (1999), BARROS (1998) e SÁ (2001), o índice de colheita para milho (grãos) varia de 0,35 a 0,65, sendo o valor de 0,55 considerado satisfatório para obtenção de alta produtividade.

Para o cálculo da produtividade potencial (PP , $kg.ha^{-1}$), tem-se que (De WIT, 1965):

$$cW = \frac{100}{100 - u} \quad (12)$$

$$PP = PPBac_f \cdot IC \cdot cW \quad (13)$$

em que cW é o fator de correção referente ao teor de água, a base de massa, na semente botânica ($u = 13\%$) e IC ao índice de colheita ($IC = 0,55 kg.kg^{-1}$).

Para elaboração do balanço hídrico cíclico, adotou-se o procedimento proposto por THORNTHWAITE & MATHER (1955), que permite estimar o armazenamento de água no solo em todos os decêndios do ano. Para tal, utiliza-se o valor de coeficiente de cultura constante e unitário ($Kc = 1$) e profundidade efetiva

do sistema radicular constante e igual a 40 cm (Z_e , cm) para qualquer distribuição de dados climatológicos disponíveis. A escolha desse procedimento foi baseada em resultados obtidos por CAMARGO (1962) e CAMARGO & SENTELHAS (1995), que demonstraram sua viabilidade de uso para as condições do Estado de São Paulo.

Para elaboração do balanço hídrico seqüencial, adotou-se o procedimento proposto por THORNTHWAITE & MATHER (1955), e modificado por DOURADO NETO et al. (1991), que permite uma variação do coeficiente da cultura. Estimou-se a evapotranspiração potencial da cultura (ETc , $mm.decêndio^{-1}$) multiplicando-se a evapotranspiração potencial de referência (ETo_j , $mm.decêndio^{-1}$), estimada pelo método de THORNTHWAITE (1948), pelo coeficiente de cultura (Kc_j) no j -ésimo decêndio:

$$ETc_j = Kc_j \cdot ETo_j \quad (14)$$

em que Kc_j é obtido na literatura por intermédio de valores tabelados em função do estágio fenológico da cultura: (i) $Kc_j = 0,40$ (se $0,00 \leq Dr_j < 0,24$); (ii) $Kc_j = 0,80$ (se $0,24 \leq Dr_j < 0,50$); (iii) $Kc_j = 1,15$ (se $0,50 \leq Dr_j < 0,61$); (iv) $Kc_j = 0,80$ (se $0,61 \leq Dr_j < 0,74$) e (v) $Kc_j = 0,50$ ($Dr_j \geq 0,74$).

A depleção de produtividade causada pela deficiência de água no solo é calculada pela relação entre a evapotranspiração atual (ETA , $mm.decêndio^{-1}$) e a evapotranspiração potencial da cultura (ETc , $mm.decêndio^{-1}$) em três diferentes fases do ciclo:

$$rET_1 = \frac{\sum_{j=1}^k ETA_{j,1}}{\sum_{j=1}^k ETc_{j,1}} \quad \text{se } 0 \leq Dr_j < 0,5 \quad (15)$$

$$rET_2 = \frac{\sum_{j=k+1}^m ETA_{j,2}}{\sum_{j=k+1}^m ETc_{j,2}} \quad \text{se } 0,5 \leq Dr_j < 0,74 \quad (16)$$

$$rET_3 = \frac{\sum_{j=m+1}^q ETA_{j,3}}{\sum_{j=m+1}^q ETc_{j,3}} \quad \text{se } Dr_j \geq 0,74 \quad (17)$$

$$Fd_1 = 1 - ky_1 \cdot (1 - rET_1) \quad \text{se } 0 \leq Dr_j < 0,5 \quad (18)$$

$$Fd_2 = 1 - ky_2 \cdot (1 - rET_2) \text{ se } 0,5 \leq Dr_j < 0,74 \quad (19)$$

$$Fd_3 = 1 - ky_3 \cdot (1 - rET_3) \text{ se } Dr_j \geq 0,74 \quad (20)$$

$$Fd = \prod_{d=1}^3 F_d \quad (21)$$

em que rET_1 , rET_2 e rET_3 se referem à relações entre a evapotranspiração real (ETa , mm.decêndio⁻¹) e a evapotranspiração da cultura (ETc , mm.decêndio⁻¹); Fd_1 , Fd_2 e Fd_3 aos fatores de depleção da produtividade potencial com base no balanço hídrico e ky_1 , ky_2 e ky_3 aos fatores de sensibilidade à deficiência hídrica referentes às fases: 1 ($0 \leq Dr_j < 0,5$) ($ky_1 = 0,2$); 2 ($0,5 \leq Dr_j < 0,74$) ($ky_2 = 0,8$) e 3 ($Dr_j \geq 0,74$) ($ky_3 = 1,0$), respectivamente.

A produtividade deplecionada (PD , kg.ha⁻¹) de grãos da cultura de milho é estimada por:

$$PD = PP \cdot Fd \quad (22)$$

em que PP se refere à produtividade potencial (kg.ha⁻¹) estimada pelo modelo e Fd ao fator de depleção de produtividade obtido em função do balanço hídrico.

Resultados e Discussão

Verifica-se, por intermédio do modelo mecanístico e determinístico, o desempenho da produtividade potencial nas dezesseis estações avaliadas (Tabela 1). Como a simulação dos resultados foi realizada a partir de dados decendiais, a partir de 1 de outubro a 11 de dezembro, verifica-se que a produtividade média de grãos, para todas as datas de semeaduras em cada localidade variou de 13.322 kg.ha⁻¹, em Cruz Alta, até 15.472 kg.ha⁻¹, em Taquari. Apesar de Cruz Alta ser localizada numa área produtora de milho e os resultados serem os mais baixos para a produtividade potencial, deve-se observar que as produtividades potenciais nas 8 datas de semeadura são mais elevadas nas primeiras datas de semeadura apresentadas e a partir de novembro, apresentam uma queda acentuada. Outra localidade em que esse fato ocorre é em Caxias do Sul, porém não de forma tão acentuada. No restante das localidades a amplitude entre a maior e a menor produtividade potencial não se evidencia tanto (em cada localidade entre as épocas de semeadura).

Na adaptação proposta ao modelo de De WIT (1965), assume-se que as equações de

estimativas de área foliar, correções dos coeficientes de respiração e crescimento, de temperatura e a estimação da produtividade potencial bruta diária descrevem com maior coerência o crescimento e desenvolvimento da cultura de milho. O índice de área foliar de milho variou até um máximo aproximado de 5 m².m⁻², o que indica um ótimo desenvolvimento das plantas. Junto a isso, existem os fatores de correção para o crescimento que regulam o crescimento das plantas de milho. A maioria desses parâmetros não é variável na escala diária nos modelos de De WIT, isso faz com que se reduza a precisão quando utilizado o modelo original. Por outro lado o modelo adaptado é mais flexível às condições de um determinado período (dez dias) o que vai conferir ao modelo maior adequação à realidade.

Em condições sem estresse hídrico, normalmente, pode-se semear em qualquer uma das oito épocas indicadas, devido aos resultados praticamente homogêneos da produtividade entre as épocas de semeadura. Ocorrendo esse fato, fica evidente que as semeaduras precoces são vantajosas no que diz respeito ao sistema de produção, pois minimiza a incidência de pragas, doenças e plantas daninhas, além de disponibilizar a área para o cultivo do “milho safrinha”, melhorando assim, a eficiência dos usos de insumos e mão-de-obra.

ASSIS (2004), utilizando um modelo estocástico de estimativa de produtividade potencial, para a cidade de Piracicaba, SP, obteve produtividades potenciais para a cultura de milho (mesmas épocas deste estudo) que variaram de 17.500 a 18.500 kg.ha⁻¹. Apesar de ter sido realizado um tratamento estocástico dos dados e as estimações serem diárias em oposição às estimações decendiais, o presente modelo apresenta maior número de parâmetros capazes de descrever melhor os acréscimos e perdas de fitomassa seca na planta. Dentro dessa mesma linha de pesquisa, DOURADO NETO et al. (2004) apresentaram um modelo (mecanístico e determinístico) para várias regiões do Brasil. Esses autores tiveram por objetivos estimar a assimilação de dióxido de carbono, com dados gerados por HEEMST (1986), estimar os coeficientes de estimação de radiação solar utilizando dados de DOORENBOS & KASSAN (1994) e estimar a produtividade potencial para a cultura do milho. Ambos os modelos (ASSIS, 2004; DOURADO NETO et al., 2004) possuem equações e relações que recorrem à utilização de parâmetros empíricos, porém no presente modelo as questões empíricas também estão contempladas, mas em menor quantidade que nos modelos citados anteriormente.

Na realidade, a maioria dos modelos de simulação de culturas é uma mistura de empirismo e mecanicidade. Mesmo os mais mecanísticos dos modelos usam o empirismo em algum nível hierárquico de sua constituição. De acordo com MONTEITH (1996), os pesquisadores se preocupam em demasia com rigorosas calibrações e testes, esquecendo que o conhecimento dos processos físicos e biológicos que estão envolvidos no desenvolvimento de certas culturas, muitas vezes, é incipiente.

Além disso, a estimação da produtividade deplecionada em função da precipitação pluvial não está contemplada pelos modelos de ASSIS (2004) e DOURADO NETO et al. (2004) e no modelo adaptado do presente trabalho é possível estimar a produtividade deplecionada em função de parâmetros como a chuva e o índice de sensibilidade da cultura ao estresse hídrico. Para a cultura da soja, já existem estudos que utilizam as condições diárias de chuva, estimando assim as produtividades potenciais e deplecionadas, como o realizado para essa cultura por MARTIN (2007), para 28 localidades do Estado de São Paulo, utilizando metodologia semelhante indicada pelo fator de estresse hídrico da cultura.

Por intermédio dos valores de produtividade deplecionada não foi possível observar uma clara tendência de estimação como se observa nas produtividades potenciais, o que dificulta a formação de regiões homogêneas quanto à produtividade deplecionada. Esse desempenho de diferentes produtividades deplecionadas é devido à diversidade ambiental que ocorre no Estado do Rio Grande do Sul. Para a localidade de Caxias do Sul, a produtividade deplecionada resultou em valores semelhantes para as oito datas de semeadura, variando de 6.000 a 8.000 kg.ha⁻¹, porém esse desempenho não se repetiu para as localidades de São Gabriel, Júlio de Castilhos, Santa Maria e Cruz Alta. Nesse caso, a produtividade deplecionada aumenta de acordo com o atraso da data de semeadura, indicando assim uma melhor época de semeadura no período que vai de 15 a 30 de novembro, resultando em maiores produtividades. Isso certamente ocorre devido a coincidência entre os períodos mais críticos da cultura de milho e as precipitações ocorrerem em datas próximas. Nas outras localidades, o padrão não está caracterizado tão facilmente, mas em linhas gerais deve-se realizar semeaduras precoces (outubro) para atingir altas produtividades.

Deve-se interpretar a relação PP/PD (Tabela 1) como a probabilidade de sucesso em relação a um advento climático. Apesar dos valores entre a produtividade potencial e a produtividade deplecionada serem diferentes dos obtidos à campo, a magnitude das diferenças (relação PP/PD) deve permanecer praticamente constante. Isso quer dizer que quanto maior for o valor dessa relação menor é a influência do risco climático sobre o desempenho da cultura. Em contrapartida, quanto menor for o valor, maior é o risco climático de ocorrência de perdas devido ao estresse hídrico. O que se torna mais interessante é a avaliação entre os locais e as datas de semeadura, no que diz respeito à interação entre essas duas variáveis.

Por meio dos resultados do risco climático (PD/PP) (Tabela 1), é possível verificar que existe um grupo de municípios em que a semeadura de milho deve ser antecipada de forma a minimizar o risco climático. Esses municípios são: Erechim, Maquiné, São Borja e Uruguaiana, sendo que esses possuem as maiores relações PD/PP, no início do período de semeadura. Em contrapartida, os municípios de São Luiz Gonzaga, São Gabriel, Iraí, Júlio de Castilhos, Taquari, Caxias do Sul e Cruz Alta possuem as maiores relações PD/PP quando a semeadura é mais atrasada, o que reduz o risco de perda de produtividade de grãos. O município de Santa Rosa possui a relação PD/PP em torno de 0,5 em praticamente todas as épocas de semeadura. Sendo assim, esse município apresenta tendência de produzir somente 50% da produtividade potencial de milho, devido às adversidades climáticas.

Tanto os resultados apresentados neste estudo, como os apresentados por LIMA (1995), GADIOLI (1999), FORSTHOFER et al. (2002) e PIONEER (2002), referem-se à produtividade potencial de grão para a cultura de milho (condições adequadas de suprimento de água e de nutrientes, sem sofrer interferências por plantas daninhas, pragas e doenças). Os valores observados por FORSTHOFER et al. (2002), para a produtividade de grãos na cultura do milho, em Porto Alegre-RS, variaram de 7.446 kg.ha⁻¹ até 11.100 kg.ha⁻¹. Dessa forma, os valores gerados por intermédio do modelo, cuja adaptação ao modelo proposto por De WIT (1965) está evidenciada nas equações 4, 5 e 15 a 21, são adequados para a comparação da produtividade potencial e deplecionada nas diferentes regiões do estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 1. Produtividade potencial (PP, kg.ha⁻¹), produtividade deplecionada (PD, kg.ha⁻¹), em cada uma das datas de semeadura, relação entre as produtividades potencial e deplecionada nas datas de semeadura para os locais avaliados.

Semeadura	Caxias do Sul			Cruz Alta			Santa Rosa			São Borja		
	PP	PD	PD/PP	PP	PD	PD/PP	PP	PD	PD/PP	PP	PD	PD/PP
1/out	15580	9032	0,58	14125	9360	0,66	13500	7585	0,56	13892	10878	0,78
11/out	15205	9003	0,59	14472	9407	0,65	12786	7022	0,55	14645	11148	0,76
21/out	15238	9012	0,59	13952	9852	0,71	13327	6795	0,51	13758	10306	0,75
1/nov	15180	8998	0,59	14193	11933	0,84	13509	6943	0,51	14154	8677	0,61
11/nov	15127	8911	0,59	14161	10749	0,76	13731	5518	0,40	14393	7544	0,52
21/nov	15072	8838	0,59	14257	12543	0,88	13654	6880	0,50	14270	3432	0,24
1/dez	15068	10624	0,71	14107	11126	0,79	13772	7083	0,51	14330	959	0,07
11/dez	14908	8860	0,59	13857	11055	0,80	13596	7990	0,59	14157	342	0,02
Semeadura	Erechim			Iraí			São Gabriel			São Luiz		
	PP	PD	PD/PP	PP	PD	PD/PP	PP	PD	PD/PP	PP	PD	PD/PP
1/out	13489	11323	0,84	14443	9267	0,64	14866	2250	0,15	15166	9947	0,66
11/out	13775	11513	0,84	13822	7949	0,58	15120	1953	0,13	14441	7029	0,49
21/out	13726	10971	0,80	14367	8456	0,59	15254	2761	0,18	14998	8088	0,54
1/nov	13711	9343	0,68	14196	10140	0,71	15123	2953	0,20	14993	7798	0,52
11/nov	13583	7105	0,52	13219	8845	0,67	15071	5378	0,36	13981	8436	0,60
21/nov	13685	6991	0,51	13314	9705	0,73	14835	7721	0,52	14179	8567	0,60
1/dez	13552	4162	0,31	12893	12194	0,95	14781	10115	0,68	14057	9231	0,66
11/dez	13274	3935	0,30	12677	12268	0,97	15122	10721	0,71	13983	11290	0,81
Semeadura	Júlio de Castilhos			Maquiné			Taquari			Uruguaiana		
	PP	PD	PD/PP	PP	PD	PD/PP	PP	PD	PD/PP	PP	PD	PD/PP
1/out	13641	3670	0,27	13328	11598	0,87	13117	3787	0,29	14367	7796	0,54
11/out	14145	4069	0,29	12781	10861	0,85	13841	3601	0,26	15125	8264	0,55
21/out	14383	3969	0,28	13101	11139	0,85	14165	4696	0,33	14200	5423	0,38
1/nov	13503	5923	0,44	13019	9644	0,74	13296	3389	0,25	14570	5489	0,38
11/nov	13609	8178	0,60	13206	9470	0,72	13559	3559	0,26	14881	6575	0,44
21/nov	13724	10501	0,77	12514	8499	0,68	13488	6110	0,45	14780	6242	0,42
1/dez	13661	9252	0,68	12508	6755	0,54	13568	6325	0,47	14921	6643	0,45
11/dez	13497	9403	0,70	12465	7878	0,63	13322	7978	0,60	14812	5808	0,39
Semeadura	Passo Fundo			Santa Maria			Vacaria			Veranópolis		
	PP	PD	PD/PP	PP	PD	PD/PP	PP	PD	PD/PP	PP	PD	PD/PP
1/out	13932	11220	0,81	13087	1391	0,11	15150	4873	0,32	15748	7195	0,46
11/out	13397	10195	0,76	13715	2587	0,19	15472	4223	0,27	15097	9752	0,65
21/out	13671	7918	0,58	12892	2296	0,18	15676	6437	0,41	15238	9198	0,60
1/nov	13432	8013	0,6	13220	2787	0,21	15688	7990	0,51	15259	9898	0,65
11/nov	13479	9146	0,68	13531	5519	0,41	15024	6678	0,44	15230	12253	0,80
21/nov	13378	10680	0,80	13465	6453	0,48	15328	9750	0,64	15357	11510	0,75
1/dez	13350	8564	0,64	13513	11281	0,83	14891	8467	0,57	15285	11475	0,75
11/dez	13090	7569	0,58	13287	11163	0,84	-	-	-	15036	11389	0,76

Conclusões

Em função dos resultados obtidos e em comparação com aqueles encontrados na literatura, conclui-se que a adaptação realizada ao modelo da Zona Agroecológica permite estimar adequadamente os valores de produtividade potencial e deplecionada para a cultura de milho no estado do Rio Grande do Sul, de modo que seja possível verificar os efeitos do clima (época e locais) sobre os valores observados de produtividade.

Referências Bibliográficas

- ASSIS, J.P. **Modelo estocástico para estimação da produtividade potencial de milho em Piracicaba, SP.** 2004, 168p. Tese de (Doutorado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2004.
- BARROS, A.H.C. **Análise de crescimento, do desenvolvimento e da produtividade da cultura do milho (*Zea mays* L.): Experimentos e modelos.** 1998. 85p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.
- BOOTE, K.J. et al. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, p.704-716, 1996.
- CAMARGO, A.P. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.21, p.163-203, 1962.
- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação de modelos para a estimativa de evapotranspiração potencial mensal em base diária, para Campinas e Ribeirão Preto (SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9. 1995. Campina Grande. Anais... Campina Grande: SBA, 1995, p.415-417.
- De WIT, C.T. **Photosynthesis of leaf canopies.** Wageningen: Pudoc, 1965. 57p. (Agriculture Research Report 663).
- De WIT, C.T.; GOUDRIAAN, J. **Simulation of Ecological Processes.** Wageningen, Pudoc. 1974. 159p.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas.** Tradução de GHEYI, H. et al. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).
- DOURADO NETO, D. et al. Modelos para estimação de assimilação de dióxido de carbono, coeficiente de extinção de radiação solar e produtividade de grãos da cultura de milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.12, n.2, p.349-353, 2004.
- DOURADO NETO, D.; SAAD, A.M.; JONG VAN LIER, Q. **Curso de agricultura irrigada.** Piracicaba: ESALQ, Departamento de Agricultura, 1991. 190p.
- FIGUEREDO JÚNIOR, L.G.M. **Modelo para estimativa de produtividade da cultura de milho no Estado de São Paulo.** 2004. 100p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- FORSTHOFER, E.L. et al. Fenologia, crescimento e desenvolvimento de híbridos de milho em três épocas de semeadura. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 24., 2002. Florianópolis, **Resumos expandidos...** Florianópolis: ABMS/Embrapa Milho e Sorgo/Epagri. 2002. (CD-ROM).
- GADIOLI, J.L. **Estimativa de rendimento de grãos e caracterização fitotécnica da cultura de milho (*Zea mays* L).** 1999. 86p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.
- HANKS, J.; RITCHIE, J.T. **Modeling plant and soil systems.** Madison, WI: ASA, CSSA and SSSA, 1991. 545p. (Agronomy Monographs 31).
- HEEMST, H.D.J. van. Physiological principles. In: VAN KEULEN, H.; WOLF, J. **Modeling of agricultural production: weather, soils and crops.** Wageningen: Pudoc, 1986. p.13-26.
- JAME, Y.W.; CUTFORTH, W. Crop growth models for decision support systems. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v.76, p.9-19, 1996.
- JONES, J.W.; KINIRY, J.R. Ceres-Maize. **A simulation model of maize growth and development.** College Station: Texas A&M University Press, 1986. 56p.

LIMA, M.G. **Calibração e validação do modelo Ceres-maize em condições tropicais do Brasil.** 1995. 119p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

MARTIN, T.N. **Modelo estocástico para estimação da produtividade de soja no Estado de São Paulo utilizando simulação normal bivariada.** 2007. 208p. Tese (Doutorado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2007.

MATZENAUER, R. et al. Relações entre rendimento de milho e variáveis hídricas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.3, n.1, p.85-92, 1995.

MATZENAUER, R.; FONTANA, D.C. Relação entre rendimento de grãos e altura de chuva em diferentes períodos de desenvolvimento do milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 5., 1987, Belém. **Coletânea de trabalhos.** Belém: SBA, 1987. p.3-6.

MONTEITH, J.L. The quest for balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, p.695-697, 1996.

PIONEER. **Resultados Milho: safra 2001/2002.** Santa Cruz do Sul: Pioneer Sementes Ltda, 2002. 20p.

REYNOLDS, J.F. Some misconceptions of mathematical modeling. **What's New in Plant Physiology**, v.10, n.11, p.41-44, 1979.

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

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

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance.** Publications in climatology, New Jersey, Drexel Institute of Technology, v.8, n.1, 1955. 104p.

VRIES, P.K.T. de et al. **Systems simulation at IRRI.** IRRI, Manila, Philippines: IRRI, 1991. (IRRI Res. Pap. Ser. 151).