

Análise econômica de lâminas de água e de doses de nitrogênio, na cultura do milho, *Zea mays* L., utilizando o modelo CERES-Maize

Paulo Sérgio Lourenço de Freitas¹, Everardo C. Mantovani², Roberto Rezende^{1*}, Antônio Carlos Andrade Gonçalves¹ e Altair Bertonha¹

¹Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil.

²Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Av. P.H. Rolfs s/n, 36571-000, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. *Author for correspondence.

RESUMO. Para a simulação dos valores necessários nas análises do presente trabalho, utilizou-se o modelo CERES-Maize que está inserido no pacote DSSAT 3.0. Nas simulações, realizadas para o município de Janaúba, Estado de Minas Gerais, foi utilizado o cultivar BR-201-Embrapa. Os dados foram simulados para três datas de semeadura de uma cultura de milho: 15/05, 15/10 e 15/11, combinadas com as opções de com e sem irrigação. Nas condições com irrigação, as lâminas de água utilizadas foram de 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44 e 48 mm, aplicadas com turno de rega de sete dias. As lâminas de água foram combinadas com as seguintes doses de nitrogênio: 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 e 210 kg ha⁻¹. Os valores foram simulados utilizando dados climáticos do período de 1977 a 1995. As análises mostraram que, para a semeadura realizada em 15 de maio, o retorno econômico foi superior ao das demais, a despeito da necessidade de maior lâmina de água aplicada, devido ao fato de a precipitação pluvial média ocorrida durante o ciclo da cultura, no período de 1977 a 1995, ter sido de apenas 12 mm.

Palavras-chave: simulação, modelo, irrigação, milho.

ABSTRACT. Economic analyses on water depth and nitrogen doses in maize, *Zea mays* L., by CERES-Maize Model. CERES-Maize model from DSSAT 3.0 package was used to simulate the necessary data for current research with BR-201 maize cultivar, undertaken in the Janaúba district, Minas Gerais, Brazil. Maize yields for three sowing dates, or rather, 15th May, 15th October and 15th November, were simulated in non-irrigation and irrigation conditions. In the latter water depth was kept at 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44 and 48 mm at seven-day intervals. Water depth coincided with nitrogen doses of 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 and 210 kg ha⁻¹. Climatic data of the 1977-1995 period were used in simulations. Analyses showed that economical gain for the 15th May sowing was higher than that on other dates, even though water depth had to be greater. This was due to the fact that average rainfall during the culture cycle in the 1977-1995 period was just 12mm.

Key words: simulation, model, irrigation, maize.

Os modelos de simulação de crescimento de culturas estão se tornando importantes no estudo de estratégias de irrigação e da economia agrícola. Os modelos oferecem uma oportunidade para gerar várias combinações de estratégias de manejo de culturas, as quais podem ser convertidas em retorno líquido para o agricultor. A partir disto, pode-se realizar a análise econômica da função de produção. A utilização de modelos possibilita, portanto, o estudo da política, do manejo e dos recursos naturais da propriedade agrícola.

O modelo CERES (*Crop Environment Resource Synthesis*) foi desenvolvido pelo *Grassland Soil and*

Water Research Laboratory). Dentre os modelos CERES, o CERES-Maize foi desenvolvido para a cultura do milho e permite as simulações dos principais processos físicos e fisiológicos: fotossíntese, respiração, acumulação e partição da biomassa, fenologia, crescimento foliar de caules e de raízes, extração de água do solo e evapotranspiração (Jones e Kiniry, 1986).

Os dados de entrada necessários para executar a simulação são: dados climáticos, solos e coeficientes fenotípicos da cultura. A construção dos arquivos necessários para a simulação foi descrita detalhadamente por Gedanken (1998).

Com estes modelos, pode-se gerar cenários que possibilitem a aplicação de informações simuladas, sob distintas estratégias alternativas dos fatores de produção (Bryant e Lacewell 1979), citados por Hood *et al.* (1987).

Os modelos de simulação são também ferramentas de grande importância no estudo da interação solo-cultura-clima, uma vez que possibilitam considerar um grande número de fatores ambientais que afetam a cultura, bem como a análise dos efeitos edáficos, o que seria impossível em experimentos convencionais, em razão dos altos custos e do longo tempo demandado para a obtenção dos resultados de pesquisa. A utilização de modelos permite, portanto, uma economia de tempo, recursos financeiros e humanos.

O manejo da irrigação tem potencial para elevar a produção e reduzir o risco associado às flutuações de produção. No entanto, introduz custos adicionais, envolvendo mão-de-obra, energia e água, além da aquisição de equipamentos.

A produção sob irrigação, entretanto, requer manejo intensivo dos recursos, a fim de maximizar a receita líquida para o produtor, sendo a programação de irrigação um meio primário para controlar os custos de mão-de-obra e de energia associados à irrigação.

Hodges e Evans (1992) avaliaram esse modelo comparando os dados reais e os simulados para a emergência da área foliar de dez híbridos, em quatro anos de experimentos. Os valores de tempo termal variam substancialmente entre os híbridos e entre os anos avaliados. Embora o modelo simule moderadamente bem a emergência das folhas, a taxa de desenvolvimento das folhas é diferente entre os híbridos e pode ser sensível ao comprimento do dia e às temperaturas extremas que não são consideradas pelo modelo. Além disto, evidencia a necessidade de melhorar a predição da temperatura do solo pelo modelo.

Pang *et al.* (1997) avaliaram o modelo CERES-Maize para as condições de clima árido comparando os dados simulados com os experimentais, para os tratamentos 0, 90, 180 e 360 kg de N ha⁻¹ e três níveis de irrigação 1/3, 3/3 e 5/3 de ET, os quais foram iguais a 200, 600 e 1.000 mm de água, respectivamente. As médias para os valores simulados de produtividade para todos os tratamentos foram 93, 102 e 105%, respectivamente, dos valores experimentais obtidos.

No Brasil, o modelo foi testado por Lima (1995), para as condições de Piracicaba, Estado de São Paulo. Os dados simulados foram comparados com os obtidos em experimento de campo. Os resultados

mostraram que o modelo estimou satisfatoriamente o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cultura do milho. Gedanken (1998) utilizou o modelo para avaliar estratégias de irrigação, para duas localidades do Estado de Minas Gerais: Sete Lagoas e Janaúba. Bowen *et al.* (1993) avaliaram a rotina de nitrogênio do modelo para as condições do cerrado, comparando os dados simulados com os obtidos experimentalmente no Centro de Pesquisa do Cerrado-Embrapa.

Economistas podem utilizar modelos para simular o impacto dos diversos fatores de entrada e de estratégias de manejo na produção e na viabilidade econômica da cultura (Cabelguenne e Jones, 1989).

A programação da irrigação para cultura do milho exige o conhecimento de métodos para determinar o tempo de aplicação de água. Steele *et al.* (1994), utilizando três anos de dados experimentais de programação de irrigação para cultura do milho, determinaram a influência dos métodos de produção de grãos e quantidade de irrigação aplicada. Para isso, utilizaram o modelo de simulação de crescimento de plantas (CERES-Maize) para estimar a matéria seca acumulada e uso da água. A produtividade máxima obtida foi de 12.200 kg.ha⁻¹.

O objetivo do presente trabalho foi simular dados de produtividade da cultura do milho, *Zea mays* L. (Poaceae), para três épocas de semeadura, para região de Janaúba, Estado de Minas Gerais, para se definir valores de lâmina de água e de dose de nitrogênio que proporcionassem o retorno líquido máximo para o produtor.

Material e métodos

Condições nas quais os dados foram simulados

Para gerar os valores utilizados nas análises do presente trabalho, foi utilizado o programa de simulação CERES-Maize que está inserido dentro do pacote DSSAT 3.0.

Nas simulações foi utilizado o cultivar de milho BR-201, desenvolvido pelo Centro Nacional de Pesquisa do Milho e Sorgo (CNPMS) da Embrapa, que ocupava, no ano de 1995, entre 5 e 7% da área semeada com a cultura no Brasil. O BR-201 é um híbrido duplo de milho, desenvolvido para os solos ácidos e/ou férteis, adaptados às condições dos cerrados brasileiros.

As simulações de produtividade do cultivar foram realizadas para o município de Janaúba (15°03' latitude sul e longitude de 44°01'; altitude de 709 m), no ano de 1998.

Os valores da produtividade para cultivo não irrigado e irrigado foram obtidos com 4, 8, 12, 16,

20, 24 30 e 36 mm, em turno de rega de 7 dias. Optou-se por esse intervalo com objetivo de promover o déficit hídrico para as aplicações das menores lâminas. Três épocas de semeadura foram combinadas com doses de 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 Kg ha⁻¹ de nitrogênio. As doses inferiores a 90 kg ha⁻¹ foram parceladas em duas aplicações e as demais, em três aplicações. As simulações foram realizadas para os dados climáticos de 18 anos, entre 1977 a 1995, e as médias das variáveis climáticas estão apresentadas na Tabela 1. O solo apresentou a seguinte granulometria: Areia grossa 25%, Areia fina 59%, silte 11% e argila 5%.

Tabela 1. Médias das variáveis climáticas do período de 1977 a 1995

Meses	Radiação (Mj m ⁻² dia ⁻¹)	Temp. máxima (° C)	Temp. Mínima (° C)	Precipitação (mm)
Janeiro	20,9	30,7	20,0	216,4
Fevereiro	23,2	31,7	20,2	92,9
Março	21,9	32,0	20,1	97,6
Abril	20,4	31,1	19,4	41,8
Mai	18,4	30,5	18,1	10,4
Junho	17,3	28,9	16,4	2,4
Julho	18,2	28,8	16,1	1,4
Agosto	20,7	30,2	16,6	3,9
Setembro	21,1	31,4	18,3	18,1
Outubro	21,5	32,4	19,8	58,6
Novembro	19,4	31,0	20,3	125
Dezembro	18,7	30,4	20,3	186,7

As características físicas e hídricas do solo estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características físicas e hídricas do solo do município de Janaúba, Estado de Minas Gerais

Camada de Solo (cm)	Capacidade de Campo (θ_{CC}) (cm ³ cm ⁻³)	Ponto de Murcha (θ_{Pmp}) (cm ³ cm ⁻³)	Umidade de Saturação (θ_S) (cm ³ cm ⁻³)	Densidade do Solo (g cm ⁻³)
0-20	0,253	0,114	0,416	1,49
20-40	0,261	0,124	0,408	1,49

O custo operacional para a produção de milho em grãos foi de R\$ 440,30.ha⁻¹ (Tabela 3). O preço do nitrogênio foi de R\$ 0,89.Kg⁻¹, estimado a partir do preço da uréia (R\$ 0,40.Kg⁻¹), considerando a proporção de 0,45 kg de nitrogênio por kg de uréia.

Para a definição dos custos de irrigação, consideraram-se os custos fixos referentes aos preços dos equipamentos (motobombas, tubulações, acessórios e aspersores), acrescidos da depreciação do sistema. Os custos variáveis compreenderam a energia elétrica despendida para alimentar o conjunto de irrigação, a mão-de-obra utilizada para manutenção e o custo de reparos.

Os custos de aquisição do equipamento para uma área de 50 ha foram de aproximadamente R\$

1.400,00.ha⁻¹, sendo a depreciação calculada tomando-se a vida útil do equipamento igual a 15 anos. O valor residual foi considerado igual a 20% do valor de aquisição, tendo o valor de depreciação de R\$ 74,67 por ano.ha⁻¹. O custo variável para aplicação da lâmina de água foi de R\$ 0,426 por milímetro.ha⁻¹ (Oliveira, 1993).

Os custos de instalação da cultura foram compostos utilizando os custos apresentados na publicação dos indicadores econômicos da Federação da Agricultura de Minas Gerais.

Tabela 3. Custos Operacionais de produção de 1 ha de milho, para safra de 96/97

Operações	Unidade	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Total (R\$)
Gradagem	HM/ha	1,40	25,00	35,00
Aração	HM/ha	2,42	25,00	60,50
Gradagem	HM/ha	0,70	25,00	17,50
Semeadura	HM/ha	0,70	25,00	16,25
Pulveriz. herbicida	HM/ha	0,19	25,00	4,75
Pulveriz. inseticida	HM/ha	0,38	25,00	9,50
Cobertura	HM/ha	0,65	25,00	32,50
colheita de grãos	HM/ha	0,74	25,00	18,50
			Subtotal 1	194,50
Insumos	Unidade	Quantidade	Valor Unitário	Total
Sementes	kg	22,0	1,40	30,80
Calcário	t	1,0	60,00	60,00
Fertilizante. 4-14-8	t	0,30	250,00	75,00
Inseticida Lorsban	l	0,60	12,50	7,50
Herbicida triamex	l	5,0	14,50	72,50
			Subtotal 2	245,80
			total (1+2)	440,30

No período da tomada de preço US\$1 = R\$ 1,14

Função de produção tendo lâmina de água e doses de nitrogênio como fatores variáveis

Após a obtenção dos valores simulados da produtividade em função da lâmina de água e da dose de nitrogênio, ajustou-se um modelo de regressão (1), para proceder à análise dos fatores de produção que proporcionaram uma combinação ótima para as condições do estudo.

$$Y = B_0 + B_1 L + B_2 N + B_3 L^2 + B_4 N^2 + B_5 LN \quad (1)$$

em que

Y – Produtividade de milho, Kg.ha⁻¹;

L – Lâmina de água, mm ha⁻¹;

N – Doses de nitrogênio, Kg.ha⁻¹; e

B₀, B₁, B₂, B₃, B₄ e B₅ - coeficientes do modelo ajustado.

Utilizou-se a equação de lucro (2) para definir, a partir dela, a lâmina de água ótima econômica e a dose econômica de nitrogênio, a serem aplicadas. Os valores devem corresponder a uma produtividade que traduza uma receita líquida máxima, dada pela equação:

$$\pi = P_Y \cdot Y - P_L \cdot L - P_N \cdot N - Co - CF \quad (2)$$

em que

π - Lucro, R\$;

P_Y - Preço do produto, R\$.kg⁻¹;

Y - Produtividade, kg. ha⁻¹;

P_L - Preço do fator água, R\$ mm⁻¹ ha⁻¹;

P_N - Preço do fator nitrogênio, R\$.kg⁻¹;

Co - Custos operacionais R\$.ha⁻¹; e

CF - Custos fixos, R\$.ha⁻¹.

Derivando a equação (1), são obtidas as equações (3) e (4), com as quais pode-se determinar o ponto de máximo. A equação (1) apresenta segunda derivada negativa, para todos os valores das variáveis independentes, condição necessária para se ter ponto de máximo.

$$\frac{\partial \pi}{\partial L} = P_Y \cdot \frac{\partial Y}{\partial L} - P_L \quad (3)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial N} = P_Y \cdot \frac{\partial Y}{\partial N} - P_N \quad (4)$$

Preço do produto

O preço do milho foi tomado dos indicadores Anuário Estatístico da Agricultura Brasileira (1996), nos 4 meses que antecederam o início da semeadura da safra de verão e para o período próximo à colheita, para a região de Patos de Minas, pois não existe cotação para região de Janaúba, Estado de Minas Gerais (Tabela 4).

Tabela 4. Preço de milho para região de Patos de Minas, Estado de Minas Gerais

Ano	1996				1997				
	Mes	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.
Preço Mínimo	7,50	7,70	7,80	7,60	6,60	6,00	6,00	6,00	6,00
Preço Máximo	8,00	8,00	9,00	8,00	7,00	6,80	6,20	6,20	6,20
Preço médio	7,80	7,84	7,94	7,79	6,80	6,50	6,05	6,05	6,05

Resultados e discussão

Dados obtidos na simulação

Os valores da duração do ciclo da cultura (germinação até maturidade fisiológica) médios, mínimos e máximos no período de 1997 a 1995, para condição em que não ocorreram déficit hídrico, estão apresentados na Tabela 5

Como as temperaturas durante o ciclo da cultura para época de semeadura de maio foram menores, o ciclo teve a maior duração.

A Tabela 6 apresenta as lâminas totais aplicadas durante o ciclo de cultura. Os valores simulados estão

apresentados nas Tabelas 7, 8 e 9. Para a semeadura, em 15 de maio, foi necessário adotar maiores valores de lâmina de água, em razão da série histórica de precipitação pluvial ser, em média, de 12 mm, em todo o ciclo da cultura. Para as semeaduras, em 15 de outubro e em 15 de novembro, a precipitação média foi 519 mm e 584 mm, respectivamente.

Tabela 5. Valores da duração do ciclo da cultura em dias

Época de semeadura	Duração do Ciclo da Cultura (dias)		
	Médio	Máximo	Mínimo
Maio	115	121	109
Outubro	101	111	96
Novembro	102	110	94

Tabela 6. As lâminas totais aplicadas durante o ciclo da cultura

Lâmina aplicada semanal	Lâmina total aplicada (mm)		
	15 de maio	15 de outubro	15 de Novembro
04	50	58	53
08	100	119	180
12	160	180	180
16	282	243	241
20	353	304	301
24	424	365	361
28	494	426	418
30	530	457	452
32	565	487	482
36	636	548	542
40	706	606	602
44	777	670	662
48	848	730	723

Observa-se na Tabela 7 e Figura 1 que, para a semeadura realizada em 15 de maio, a precipitação pluvial é insuficiente para proporcionar qualquer crescimento vegetativo. As doses de nitrogênio superiores a 90 kg.ha⁻¹ proporcionaram aumento na produtividade para lâmina de água superiores a 24 mm, aplicadas com turno de rega sete dias. A partir da lâmina de água de 36 mm, ocorrem decréscimos na produtividade, com aumento da lâmina de água, para aplicações de doses de nitrogênio de até 60 kg.ha⁻¹, em razão do aumento da lixiviação de nitrogênio com o acréscimo da lâmina de água aplicada, como pode ser observado na Figura 3. Entretanto, para doses de nitrogênio maiores que 60 kg ha⁻¹ e menores que 90 kg.ha⁻¹, a lixiviação de nutrientes promovida pelo acréscimo das lâminas de água aplicadas, superiores a 32 mm, não causam decréscimos significativos na produtividade. A lixiviação ocorrida com aplicação da lâmina de água de 32 mm, para doses de nitrogênio maiores que 90 kg.ha⁻¹, foi, aproximadamente, de 28 kg.ha⁻¹. Por outro lado, para aplicação da lâmina de 48 mm, a lixiviação foi da ordem de 48 kg.ha⁻¹ de N. Em razão disto, as aplicações de lâminas de água superiores à necessária não promoveram reduções na produtividade da cultura.

Tabela 7. Dados de produtividade para cultura milho, para semeadura em 15 de maio, em função da lâmina de água aplicada em um período de sete dias e das doses de nitrogênio

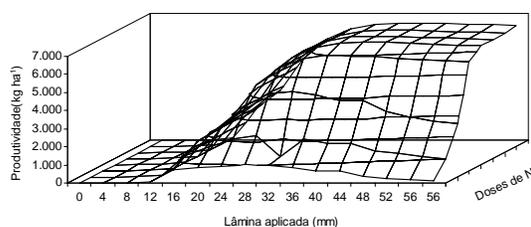
N kg ha ⁻¹	Lâmina de água (mm)													
	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52
0	0	15	22	87	761	834	923	1.023	979	839	685	685	357	237
30	0	14	41	118	1.215	1.653	2.105	2.307	1.124	2.120	1.884	1.884	1.461	1.286
60	0	14	48	141	1.636	2.384	3.578	4.218	4.339	4.167	3.855	3.855	3.249	2.970
90	0	14	49	140	1.690	2.702	4.390	5.377	5.826	6.014	5.991	5.991	5.857	5.782
120	0	14	48	144	1.711	2.746	4.497	5.580	6.120	6.372	6.399	6.399	6.347	6.305
150	0	14	48	144	1.711	2.746	4.497	5.580	6.120	6.372	6.399	6.399	6.347	6.305
180	0	14	48	144	1.711	2.745	4.497	5.582	6.121	6.376	6.403	6.403	6.355	6.315
210	0	14	48	144	1.711	2.745	4.497	5.582	6.134	6.401	6.441	6.441	6.423	6.395

Tabela 8. Dados de produtividade para a cultura do milho, para semeadura em 15 de outubro, em função da lâmina de água aplicada em um período de sete dias e das doses de nitrogênio.

N kg ha ⁻¹	Lâmina de água (mm)													
	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	
0	917	979	1.078	1.074	1.109	1.045	951	875	779	716	634	570	517	
30	1.828	1.944	2.126	2.084	2.076	1.963	1.889	1.771	1.662	1.501	1.405	1.283	1.199	
60	2.707	3.043	3.466	3.582	3.608	3.517	3.460	3.387	3.234	3.825	2.934	2.798	2.684	
90	3.107	3.666	4.320	4.624	4.979	5.148	5.236	5.283	5.309	5.713	5.326	5.305	5.264	
120	3.199	3.771	4.453	4.791	5.171	5.364	5.491	5.564	5.615	5.793	5.690	5.692	5.667	
150	3.198	3.770	4.452	4.789	5.169	5.366	5.490	5.563	5.614	5.803	5.687	5.690	5.664	
180	3.199	3.771	4.454	4.791	5.172	5.368	5.493	5.568	5.618	5.810	5.694	5.695	5.671	
210	3.201	3.786	4.471	4.810	5.197	5.395	5.525	5.603	5.660	5.814	5.745	5.754	5.736	

Tabela 9. Dados de produtividade para cultura do milho, para a semeadura em 15 de novembro, em função da lâmina de água aplicada e das doses de nitrogênio

N kg ha ⁻¹	Lâmina de água (mm)													
	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	
0	485	544	569	620	607	566	523	474	424	378	340	310	286	
30	948	1.064	1.090	1.293	1.268	1.220	1.194	1.122	1.054	989	921	856	800	
60	1.516	1.734	1.900	2.423	2.549	2.518	2.490	2.428	2.413	2.337	2.283	2.202	2.141	
90	1.769	2.147	2.569	3.710	4.182	4.402	4.562	4.690	4.764	4.822	4.840	4.833	4.810	
120	1.838	2.274	2.478	3.974	4.500	4.762	4.994	5.074	5.310	5.399	5.434	5.457	5.464	
150	1.838	2.272	2.477	3.971	4.500	4.761	4.999	5.067	5.309	5.398	5.433	5.459	5.463	
180	1.838	2.274	2.479	3.975	4.502	4.764	5.003	5.078	5.315	5.402	5.439	5.463	5.469	
210	1.849	2.286	2.516	4.013	4.545	4.814	5.056	5.134	5.380	5.464	5.511	5.538	5.546	

**Figura 1.** Produtividades simuladas para semeadura em 15 de maio, no período de 1977 a 1995

Na Tabela 8 e Figura 2, podem ser observados acréscimos na produtividade com aplicações de lâminas superiores a 24 mm para doses superiores a 90 kg.há⁻¹. Lâminas maiores que 36 mm, provocaram pequenos decréscimos para doses de nitrogênio superiores a 60 kg.ha⁻¹. Para doses inferiores a 60 kg.ha⁻¹, as lixiviações de nitrogênio contribuem para redução da produtividade (Figura 3). A quantidade de nitrogênio absorvido pela cultura diminui com aumento lâmina de água

aplicada para doses inferiores a 60 kg.ha⁻¹ e para doses maiores de nitrogênio aplicado. Apesar das maiores lixiviações de nitrogênio, a quantidade absorvida é a mesma (Figuras 3 e 4). Para menores doses de nitrogênio, a produtividade máxima ocorre para menores lâminas aplicadas, pois, para esta condição, as pequenas quantidades lixiviadas influenciaram as produtividades, o que não ocorreu para as altas doses de nitrogênio aplicadas.

Observa-se na Tabela 9 e Figura 5, comportamentos semelhantes entre as semeaduras de 15 de outubro e 15 de novembro quanto às variações da produtividade com as lâminas de água e doses de nitrogênio, para as maiorias das situações. Para as doses de nitrogênio superiores a 90 kg.ha⁻¹, o acréscimo da lâmina de água aplicada proporcionou pequenos aumentos na produtividade, enquanto para a semeadura em 15 de outubro (Tabela 8), a partir da lâmina aplicada de 36 mm a produtividade decresceu.

Para semeadura em 15 de outubro, a evapotranspiração da cultura (ETc) calculada pelo modelo foi de 364 mm, para a lâmina de água aplicada de 8 mm, e de 422 mm, para a lâmina aplicada de 30 mm, com turnos de rega de sete dias. A menor evapotranspiração ocorrida para a condição da lâmina de 8 mm, deveu-se à redução do ciclo da cultura, em razão do déficit hídrico ocorrido.

As precipitações mínima, média e máxima, no período de 1977 a 1995, ocorridas durante o ciclo da cultura foram de 273, 535 e 739 mm, respectivamente.

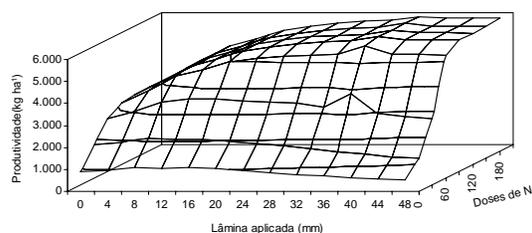


Figura 2. Produtividades simuladas para semeadura em 15 de outubro, no período de 1977 a 1995

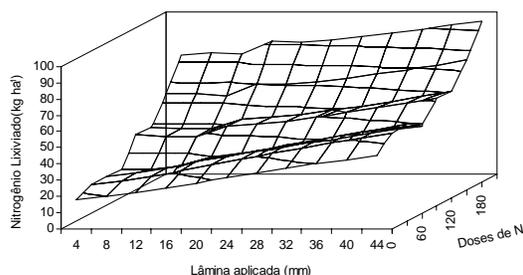


Figura 3. Gráfico da lixiviação da de nitrogênio em função lâmina de água e doses aplicadas para a semeadura em 15 de outubro.

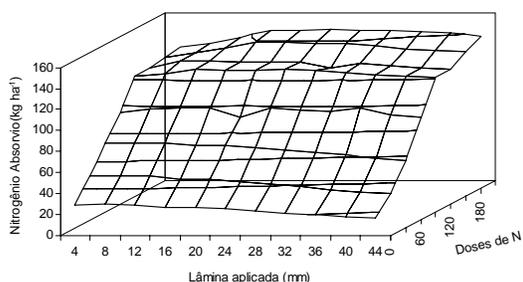


Figura 4. Gráfico da absorção da de nitrogênio em função lâmina de água e doses aplicadas para a semeadura em 15 de outubro

As menores produtividades foram obtidas para as semeaduras em 15 de outubro e 15 de

novembro. Isto ocorreu em razão da menor disponibilidade de radiação solar, pois neste período de maiores precipitações, os maiores valores de nebulosidade tendem a promover menor disponibilidade de radiação solar. Estes resultados concordam com os encontrados por Gendaken (1998).

As combinações de lâmina e doses de nitrogênio, para as semeaduras em 15 de outubro e 15 de novembro, apresentaram valores de produtividade máxima inferiores àqueles obtidos para semeadura em 15 de maio. Para o ano agrícola de 77/78, os dados de radiação e temperatura estão apresentados nas Figuras 6 e 7. Para a análise, tomou-se a lâmina e a dose de nitrogênio que proporcionaram a máxima produtividade para o ano agrícola de 77/78, sendo esta de 6.563, 5.485 e 4.481 kg.ha⁻¹, respectivamente, nas semeaduras de 15 de maio, 15 de outubro e 15 de novembro.

As temperaturas médias e a radiação solar ocorridas durante o ciclo da cultura, para semeadura em 15 de maio, 15 de outubro e 15 de novembro foram 22,7; 25,7 e 26,8°C, 18,8, 20,0 e 19,5 MJ.d⁻¹.m⁻², respectivamente, sendo o desvio padrão da radiação solar de 3,5; 6,8 e 7,2, respectivamente.

A radiação solar média durante a fase de floração até à maturação fisiológica para épocas de semeadura de maio, outubro e novembro foi de 21,0; 18,2 e 20,2 MJ.d⁻¹.m⁻² e o desvio padrão 2,6; 7,0 e 7,6 MJ.d⁻¹.m⁻², respectivamente. A maior radiação solar explica a maior produtividade simulada para a semeadura em maio, quando comparada com as demais, pois o modelo utiliza a metodologia do uso eficiente da radiação para calcular a produção de matéria seca. As menores produtividades foram obtidas, para datas de semeadura de 15 de outubro e 15 de novembro, quando comparadas com a de 15 de maio, em razão da menor disponibilidade de radiação.

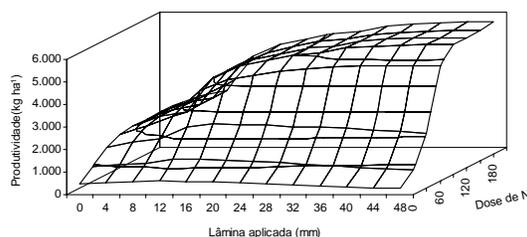


Figura 5. Produtividades simuladas para data de semeadura de 15 de novembro, para o período de 1977 a 1995

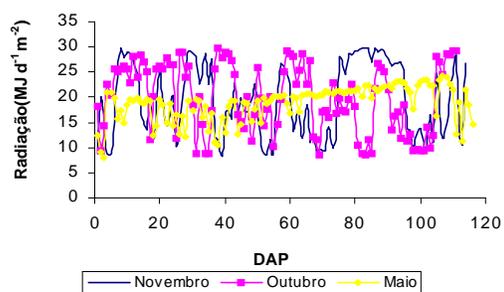


Figura 6. Radiação solar para as três datas de semeadura

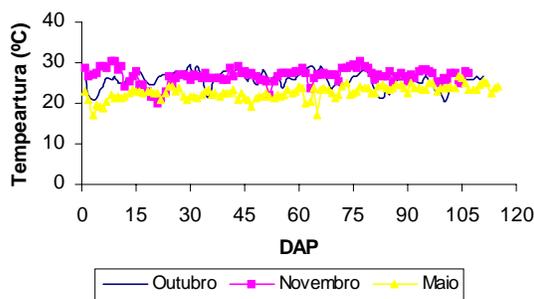


Figura 7. Temperatura média, ocorrida durante o ciclo da cultura

Função de produção ajustada para as três épocas de semeadura

Função de produção para a semeadura em 15 de maio

$$Y = -1970,58 + 175,14 L - 2,42 L^2 + 30,89 N - 0,151 N^2 + 0,5955 N L \quad (5)$$

$$R^2 = 0,90$$

em que

Y – Produtividade de milho, kg ha⁻¹ ;

L – Lâmina de água, mm; e

N – Doses de nitrogênio, kg.ha⁻¹.

Função de produção para a semeadura em 15 de outubro

$$Y = -405,07 + 50,35 L - 1,56 L^2 + 49,50 N - 0,172 N^2 + 0,5027 N L \quad (6)$$

$$R^2 = 0,95$$

Função de produção para a semeadura em 15 de novembro

$$Y = -415,97 + 83,48 L - 1,83 L^2 + 39,27 N - 0,1453 N^2 + 0,4881 N L \quad (7)$$

$$R^2 = 0,93$$

Todos os coeficientes, ajustados para as três datas de semeadura foram significativos ao nível de 0,2% (p<0,002).

Produtividade física máxima

Para a semeadura em 15 de maio

Derivou-se a equação 5 em função da lâmina de água e da dose de nitrogênio, obtendo-se as equações 8 e 9.

$$\frac{\partial Y}{\partial L} = 175,14 - 4,84 L + 0,5955 N \quad (8)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial N} = 39,89 - 0,3020 N + 0,5955 L \quad (9)$$

A solução das equações 8 e 9 é a produtividade máxima de 7.238 Kg.ha⁻¹ que foi obtida com a dose de nitrogênio de 229 Kg.ha⁻¹ e lâmina de água de 64 mm.

Para a semeadura em 15 de outubro

Derivou-se a equação 6 em função da lâmina de água e da dose de nitrogênio, obtendo-se as equações 10 e 11.

$$\frac{\partial Y}{\partial L} = 59,35 - 3,01 L + 0,3509 N \quad (10)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial N} = 48,50 - 0,344 N + 0,3509 L \quad (11)$$

A produtividade máxima de 6.051 Kg ha⁻¹ foi obtida com uma dose de nitrogênio de 183 Kg ha⁻¹ e lâmina de água de 41 mm.

Para a semeadura em 15 de novembro

Derivou-se a equação 7 em função da lâmina de água e da dose de nitrogênio, obtendo-se as equações 12 e 13.

$$\frac{\partial Y}{\partial L} = 83,48 - 3,66 L + 0,4881 N \quad (12)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial N} = 39,27 - 0,2906 N + 0,4881 L \quad (13)$$

Resolvendo as equações 12 e 13, encontra-se uma produtividade máxima 6.169 Kg ha⁻¹, obtida com a dose de nitrogênio de 224 Kg ha⁻¹ e lâmina de água de 56 mm.

Dose de nitrogênio e lâmina de água máxima econômica

Para a semeadura em 15 de maio

$$\frac{\partial \pi}{\partial L} = 175,14 - 4,84 L + 0,5955 N = \frac{P_L}{P_Y} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial N} = 38,89 - 0,3020 N + 0,5955 L = \frac{P_N}{P_Y} \quad (15)$$

Para a semeadura em 15 de outubro

$$\frac{\partial \pi}{\partial L} = 59,35 - 3,01 L + 0,3509 N = \frac{P_L}{P_Y} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial N} = 48,50 - 0,344 N + 0,3509 L = \frac{P_N}{P_Y} \quad (17)$$

Para a semeadura em 15 de novembro

$$\frac{\partial \pi}{\partial L} = 83,48 - 3,66 L + 0,4881 N = \frac{P_L}{P_Y} \quad (18)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial N} = 39,27 - 0,2906 N + 0,4881 L = \frac{P_N}{P_Y} \quad (19)$$

Considerando-se as equações de 14 a 19, as quais expressam o lucro marginal em relação aos fatores de produção, e a equação de lucro (2), para as três datas de semeadura, calcularam-se as lâminas de água e doses de nitrogênio econômicas e o lucro, para preço máximo, mínimo e médio de milho, que estão apresentados na Tabela 3, considerando o preço do nitrogênio e preço da aplicação da lâmina de água. Os resultados obtidos, para cada data de semeadura e preço do milho, estão apresentados na Tabela 7.

Para a semeadura ocorrida em maio, obteve-se lucro quando se adotou o preço máximo e quando se adotou o preço médio obtido para o milho. Para as datas de semeadura em 15 de outubro e 15 de novembro, respectivamente, obteve-se lucro somente quando se adotou o preço máximo. Para as demais datas e preços, o lucro foi inferior ao custo fixo e a produção não deveria ser realizada.

Para a semeadura em 15 de outubro, a menor utilização dos dois fatores de produção, doses de nitrogênio e lâminas de água, quando comparada com as outras duas datas de semeaduras, não proporcionou um aumento de lucro em relação à semeadura em 15 de maio. Mas, quando comparada

à semeadura em 15 de novembro, a redução da utilização dos dois fatores de produção proporcionou um aumento no lucro de R\$ 20,05, para o preço máximo obtido pelo milho.

O cultivar de milho BR-201 não apresenta produtividade compatível com o nível de tecnologia adotada porque sua produtividade é inferior a de outros cultivares disponíveis no mercado, o que leva a se recomendar, para as condições estudadas, outro cultivar com maior potencial produtivo.

De acordo com os dados da Tabela 10, a cultivar BR-201 deveria ser utilizada somente com semeadura em 15 de maio, desde que o preço do milho esteja situado acima do preço médio obtido. Nas outras duas datas de semeadura, esta cultivar somente deveria ser adotada caso se tenha comercializado o milho com preço máximo.

Os valores de produtividade simulados para a cultura com data de semeadura de 15 de outubro e de 15 de novembro foram inferiores ao valor obtido para a cultura com semeadura em 15 de maio. Este resultado deve estar associado ao efeito da menor radiação solar disponível para as culturas semeadas no período de maior ocorrência de chuvas (final do ano). Quanto ao uso do modelo CERES-Maize, constatou-se que o mesmo não foi sensível à aplicação de lâminas de água excessivas, superiores à necessária. A redução de produtividade gerada pelo modelo pode ser ignorada. Em função do baixo potencial de produção, a cultivar utilizada neste trabalho somente se mostra adequada quando o milho estiver sendo cultivado acima do preço médio. Recomenda-se buscar outras cultivares, com maior potencial produtivo, compatível com o nível de tecnologia adotado, para aumentar a receita líquida da cultura, tornando-a viável economicamente, nas condições climáticas menos favoráveis.

Tabela 10. Resultados das doses econômicas

Data de semeadura	Preço do milho (60 kg)	Lâmina de água (mm)	Dose de nitrogênio (kg ha ⁻¹)	Produtividade do milho (kg ha ⁻¹)	Lucro (R\$/ha) Custo variável médio	Lucro (R\$ ha ⁻¹) Custo fixo médio
15 de Maio	9,00	61	202	7.152	427,29	352,82
	7,79	60	198	7.123	283,33	208,86
	6,00	59	188	7.044	-71,24	-2,63
15 de Outubro	9,00	39	162	5.928	297,28	228,81
	6,80	38	155	5.938	78,55	4,08
	6,00	37	152	5.906	0,42	-74,89
15 de Novembro	9,00	49	196	6.081	277,23	202,76
	6,50	47	185	6.000	25,29	-49,18
	6,00	47	182	5.970	-24,60	-94,07

Referências

- ANUÁRIO ESTATÍSTICO DA AGRICULTURA BRASILEIRA. FNP Consultoria & Comércio São Paulo, set. 1996.
- BOWEN, W.T. *et al.* Evaluation of the nitrogen submodel of CERES-Maize following legume green manure incorporation. *Agron. J.*, Madison, v.85, p.153-159, 1993.
- CABELGUENNE, M.; JONES, C.A. Simulation of cropping systems in Southern France. In: SUMMER COMPUTER SIMULATION CONFERENCE, 1989, Austin, Texas. *Proceeding...* Austin, Texas: 1989. p. 707-711.
- GEDANKEN, A. *Utilização do modelo Ceres-Maize para avaliar estratégias de irrigação em duas regiões de Minas Gerais.* 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.
- HODGES, T.; EVANS, D.W. Leaf emergence and leaf duration related to thermal time calculations in CERES-Maize. *Agron. J.*, Madison, v.84, n.4, p.724-730, 1992.
- HOOD, C. P. *et al.* Computer analysis of soybean irrigation management strategies. *Trans. ASAE*, St. Joseph, v.30, p. 417-423, 1987.
- JONES, C.A.; KINIRY, J. R. *CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development.* College Station: Texas A & M University Press, 1986.
- LIMA, M. G. *Calibração e validação do modelo CERES-Maize em condições tropicais do Brasil.* 1995. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1995.
- OLIVEIRA, S. L. *Funções de resposta do milho doce ao uso de irrigação e nitrogênio.* 1993. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1993.
- PANG, X. P. *et al.* Yield and nitrogen uptake prediction by CERES-Maize model under semiarid conditions. *Soil Sci.*, Baltimore, v.61, p.254-256, 1997.
- STEELE, D. D. *et al.* Field comparison of irrigation scheduling methods for corn.. *Trans. ASAE*, St. Joseph, v.37, p. 1197-1203, 1994.

Received on May 08, 2001.

Accepted on September 13, 2001.