

# Penalização da produtividade da cultura do milho imposta pelo modelo CERES-Maize

Paulo Sérgio Lourenço de Freitas<sup>1\*</sup>, Everardo Chartuni Mantovani<sup>2</sup>, Gilberto Chohaku Sedyama<sup>2</sup> e Luiz Cláudio Costa<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. \*Autor para correspondência. e-mail: pslfreitas@uem.br

**RESUMO.** O presente trabalho foi realizado com o objetivo analisar a penalização imposta pelo modelo CERES-Maize as variáveis de produção da cultura do milho. Também foram analisadas a evaporação da água do solo e a evapotranspiração da cultura, calculadas pela metodologia utilizada pelo CERES-Maize e pela metodologia utilizada pelo SISDA 3.0, que utiliza o coeficiente de cultura para calcular a evapotranspiração da cultura e o coeficiente de penalização para umidades do solo abaixo da capacidade de campo. Com o objetivo de comparar os dados simulados com os experimentais, foi instalado, em campo, um experimento com a cultura do milho, com os seguintes tratamentos: cinco lâminas de água e dois coeficientes de uniformidade de aplicação de água. A partir dos resultados obtidos com as simulações, e com base nas condições em que foi conduzido o experimento, pode-se concluir que o modelo penalizou severamente a produtividade da cultura para os tratamentos em que ocorreram déficit de água acentuado. A evaporação da água do solo e a transpiração da cultura calculadas pelo modelo CERES-Maize superestimaram a evapotranspiração de referência calculada pela equação de Penman-Monteith. A evapotranspiração da cultura calculada por essa metodologia fez com que o modelo superestimasse as necessidades hídricas da cultura.

**Palavras-chave:** CERES-Maize, evapotranspiração, evaporação, irrigação, lâmina de água.

**ABSTRACT. Penalization model of maize productivity by CERES-Maize.** The present work analyzes penalization imposed by the CERES-Maize model in the corn yield variables. The direct soil water evaporation and the crop evapotranspiration were also studied according to CERES-Maize model and SISDA 3.0, using crop coefficient to calculate evapotranspiration and penalization of soil water under field capacity. To compare simulated data with experimental results, a cornfield experiment was carried out with the following treatments: five irrigation water depths and two coefficients of uniformity of water application. Based on simulations and on experimental conditions, it was concluded that the penalization imposed by the model influenced severely the corn crop yield, for treatments with soil water deficit. The soil water evaporation and the crop transpiration calculated by the CERES-Maize model overestimated the rate of the reference evapotranspiration calculated by Penman-Monteith equation. The corn crop evapotranspiration calculated by CERES-Maize model overestimated the real crop water needs.

**Key words:** CERES-Maize, evapotranspiration, water evaporation, irrigation, water depths.

## Introdução

Os modelos de simulação são ferramentas que permitem gerar cenários, considerando as diversas combinações dos fatores que influenciam a produtividade das culturas. Desta forma, é possível avaliar as estratégias mais adequadas em cada condição, podendo modificar a estratégia de irrigação para prever as alterações nos

componentes de produção e de outras variáveis, como a evapotranspiração e as necessidades de água da cultura. Além disso, é possível combinar os resultados do modelo com os fatores econômicos para a análise de riscos associados a cada estratégia (Jones e Ritchie, 1990).

O modelo CERES (*Crop Environment Resource Synthesis*) foi desenvolvido pelo *Grassland Soil and Water Research Laboratory* (Jones e Kiniry, 1986).

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. Os modelos de simulação CERES estão agrupados em um Sistema de Suporte à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT), no qual se encontram os vários modelos para as diferentes culturas: milho (CERES-Maize), trigo (CERES-Wheat), sorgo (CERES-Sorghum), arroz (CERES-Rice), cevada (CERES-Barley), girassol (CERES-Sunflower) etc (IBSNAT, 1989). Sua versão 3.1 permite ao usuário obter o desempenho espacial das simulações e das análises dos resultados (Thornton *et al.*, 1997).

Gedanken (1998) utilizou o modelo CERES-Maize para simular os dados de produtividade da cultura do milho com o objetivo de avaliar as estratégias de irrigação, para duas localidades do Estado de Minas Gerais. Os dados foram simulados para as datas de plantio de 15/5, 15/10 e 15/12 e duas lâminas de irrigação de 8 e 20 mm. Os resultados mostraram que a aplicação da lâmina de 20 mm apresentou maior relação custo-benefício para todas as datas de plantio.

Lima (1995) testou para as condições de Piracicaba, SP, e os dados simulados foram comparados com os obtidos em experimento de campo, mostrando que o modelo estimou satisfatoriamente o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cultura do milho.

Pang *et al.* (1997b) 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<sup>-1</sup> 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 aplicada, respectivamente. As médias para os valores simulados de produtividade para todos os tratamentos foram 93%, 102% e 105%, respectivamente, dos valores experimentais obtidos.

O conhecimento da demanda de água durante os períodos de severos défices hídricos é necessário para o desenvolvimento do manejo da água. Hook (1994) trabalhou com uma série de 53 anos de dados climáticos, de 36 localidades do estado Geórgia-EUA, para simular as perdas na produtividade, utilizando o modelo CERES-Maize. Nos anos em que ocorreram as condições mais severas de déficit hídrico, as perdas na produtividade da cultura do milho foram, aproximadamente, de 75%.

Wafula (1995) testou uma versão adaptada para as

condições do Kênia, África. As variáveis simuladas foram razoavelmente próximas das experimentais para diferentes localidades. Com uma série de 30 anos de dados climáticos, foi simulada a produtividade da cultura, combinando várias estratégias de manejo com o objetivo de auxiliar os produtores nas tomadas de decisão a respeito do manejo e das implicações econômicas. O modelo também foi utilizado para simular os dados de produtividade na Hungria (Kovacs *et al.*, 1995) e na França (Plantureux *et al.*, 1991).

A influência da uniformidade de irrigação de água na produtividade das culturas e na lixiviação de nitrogênio foi avaliada por Pang *et al.* (1997a), com uso do modelo CERES-Maize. Para introduzir o efeito da uniformidade de aplicação de água na produtividade, os autores utilizaram a metodologia proposta por Letey *et al.* (1994). As simulações foram realizadas para os níveis de uniformidades de aplicação, isto é, para o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) de 100%, 90% e 75% e dois níveis de aplicação de nitrogênio 180 e 240 kg ha<sup>-1</sup>. Não ocorreu diferença de produtividade entre os tratamentos com a uniformidade de aplicação de água de 90% e 100%, porém a produtividade foi menor para o tratamento de CUC de 75%. A redução na produtividade começou a partir da aplicação de lâminas de água superiores a 400 mm, e a máxima redução ocorreu para o nível de 800 mm de aplicação de água. A desuniformidade de irrigação aumentou a lixiviação de nitrogênio, sendo a taxa máxima de lixiviação de 10 a 15 kg ha<sup>-1</sup>.

O presente trabalho teve como objetivo analisar a penalização imposta às variáveis de produção da cultura do milho pelo modelo CERES-Maize.

## Material e métodos

As simulações foram realizadas com o modelo CERES-Maize, que está inserido no pacote DSSAT 3.5 (IBSNAT).

Elas foram realizadas para as condições de um experimento instalado na Estação Experimental de Coimbra, pertencente à Universidade Federal de Viçosa, Estado de Minas Gerais, localizada nas coordenadas geográficas: latitude de 20° 51' S, longitude de 42° 47' W e altitude 720 m.

### Delineamento do experimento de campo

O experimento de campo foi instalado de acordo com o esquema apresentado na Figura 1. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso e os tratamentos constaram de cinco lâminas e duas uniformidades de irrigação (CUC): alta (84%) e baixa (67%), aproximadamente. A coleta dos dados

para análise foi realizada em áreas em torno dos coletores instalados nas parcelas, com o objetivo de analisar a influência da água aplicada nos componentes de produção da cultura. No tratamento L1A, foi aplicada uma lâmina de água suficiente para elevar a umidade do solo, determinada antes da irrigação, até que fosse atingida a capacidade de campo, que doravante será denominada lâmina de água adequada. As lâminas aplicadas nos demais tratamentos foram relativas ao tratamento L1A da seguinte forma: nos tratamentos L2A, L3A, L4A, L5A foram aplicados 50%, 75%, 125% e 150% da lâmina, respectivamente, com uniformidade de aplicação alta (CUC>80%). No L1B, L2B e L3B aplicaram-se 50%, 75% e 100%, respectivamente, da lâmina aplicada em L1A, com uniformidade de aplicação baixa (CUC<70%). Para a análise estatística do experimento, fez-se a seguinte consideração: para os tratamentos L1A, L1B, L2A, L2B e L3B, foram feitas três repetições com nove coletores de água, totalizando 27 coletores; para os outros tratamentos, L3A, L4A e L5A, utilizaram-se três repetições, com três coletores cada, totalizando nove coletores. Para a análise estatística, comparando todos os tratamentos, considerou-se apenas o bloco 3, dos tratamentos com 27 coletores (Figura 1).

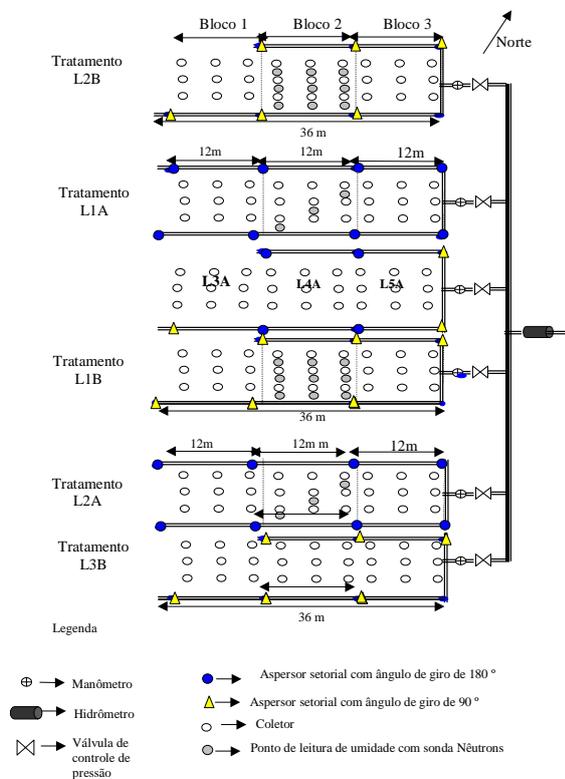


Figura 1. Esquema do sistema de irrigação instalado na área experimental.

Dados utilizados nas simulações

As simulações foram realizadas, considerando as lâminas de água precipitadas em cada coletor de água de irrigação das 25 irrigações instaladas nas parcelas experimentais (Figura 1), e também para os valores médios de lâminas de água aplicadas nos tratamentos.

A semeadura foi realizada no dia 17 de maio e a colheita no dia 23 de novembro de 1999, tendo sido utilizado o cultivar BR-201. Os coeficientes genéticos da cultivar, determinados em campo por Gendaken (1998), foram:  $P_1=275,2$ ;  $P_2=0,75$ ;  $P_3=780v$   $G_2=902$  e  $G_3=5$  Nas Tabelas 1 e 2 estão apresentadas as características físico-hídricas e granulométrica do solo, respectivamente.

Tabela 1. Características físico-hídricas

Camada (cm)	Capacidade de Campo	Ponto de Murcha	Densidade Aparente
0-20	42,6	30,0	1,05
20-40	45,0	32,0	1,09

Os dados meteorológicos foram obtidos de uma estação automática instalada próxima ao experimento. Foram coletados os dados de precipitação, temperaturas máxima, média e mínima, radiação solar, umidade relativa e velocidade e direção do vento.

Tabela 2. Análise granulométrica.

Camada (cm)	Areia Grossa (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)
0 - 20	08	03	18	71
20 - 40	05	03	06	86

Arquivos de entrada para realizar as simulações com o modelo CERES-Maize

Para a realização das simulações, foi necessário obter os dados de clima, solo e os coeficientes genéticos da cultura do milho. Para preencher o arquivo de clima, utilizaram-se os dados de temperaturas máxima e mínima, precipitação e radiação solar obtidos de uma estação meteorológica instalada no experimento de campo (Figura 1), no período de 17 de maio a 31 de dezembro de 1999. O arquivo de solo foi criado com os dados de solo do experimento (Tabelas 1 e 2) e o arquivo com os dados genéticos da cultura foi obtido do trabalho de Gendaken (1998).

Para o manejo da irrigação, foram inseridos no modelo, para cada tratamento, os valores das lâminas de água, coletadas em cada pluviômetro, nas 25 irrigações realizadas, instaladas no experimento (Figura 1). As simulações foram realizadas para cada área em torno dos pluviômetros, totalizando 162 simulações para o mesmo solo, clima e cultura, todavia, para lâminas de água, aplicadas de forma distinta.

### Cálculo da evapotranspiração da cultura utilizando o modelo CERES-Maize e da penalização das variáveis devido ao déficit hídrico

A descrição detalhada do modelo pode ser encontrada em Jones e Kiniry (1986).

O modelo CERES-Maize utiliza dois fatores de penalização das variáveis de produção da cultura, um que afeta a fotossíntese e é menos sensível, e o outro que afeta a expansão celular e é mais sensível. O fator de penalização é a relação entre o potencial total diário de ascensão de água pelas raízes e a transpiração da cultura.

Os cálculos da evapotranspiração de referência foram efetuados com o modelo SISDA 3.0 (Mantovani e Costa, 1997), utilizando a metodologia proposta por Penman-Monteith, padrão FAO 1991.

## Resultados e discussão

### Fator de penalização do modelo

Na Tabela 3 estão apresentados os valores de estresses de água, calculados pelo modelo CERES-Maize, inserido no DSSAT 3.5. Pode-se observar que o estresse ocorre a partir do início da floração. Para os tratamentos L1A e L1B, as lâminas de água aplicadas foram praticamente iguais, entretanto, o coeficiente de uniformidade de Christiansen foi de 84% e 67%, respectivamente, o que propiciou uma produtividade experimental de 6.038 e 5.114 kg ha<sup>-1</sup> e uma produtividade simulada de 5.186 e 4.659 kg ha<sup>-1</sup>; a diferença entre as produtividades simuladas para os dois tratamentos foi em razão da pequena distinção entre as lâminas de água acumuladas nos dois tratamentos. O valor da produtividade simulada para o tratamento L1B aproxima-se do valor da produtividade experimental, pelo fato de a penalização imposta pelo modelo fazer com que ocorra essa coincidência, enquanto para o tratamento L1A, no qual foram aplicadas lâminas de água da mesma magnitude, o modelo subestimou os valores da produtividade experimental.

**Tabela 3.** Estresse de água simulado para os tratamentos, para simulações com as lâminas médias aplicadas em cada tratamento.

Estágios de	Estresse hídrico							
	L <sub>1</sub> A	L <sub>1</sub> B	L <sub>2</sub> A	L <sub>2</sub> B	L <sub>3</sub> A	L <sub>3</sub> B	L <sub>4</sub> A	L <sub>4</sub> B
Início	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Semear-dura	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Germinação	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Emergência	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fase juvenil	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Floração	0,00	0,00	0,05	0,13	0,01	0,01	0,00	0,00
Florescimento	0,14	0,20	0,37	0,46	0,29	0,36	0,04	0,00
Ench. Grãos	0,34	0,36	0,70	0,64	0,26	0,39	0,05	0,02
Maturação	0,24	0,21	0,84	0,92	0,22	0,28	0,04	0,01
Colheita	0,24	0,21	0,84	0,92	0,22	0,28	0,04	0,01

As penalizações impostas pelo modelo para os tratamentos L2A e L2B (Tabela 3) propiciaram produtividades simuladas desprezíveis, enquanto no campo foram obtidas produtividades muito superiores. O modelo penaliza excessivamente a produtividade da cultura, fato também observado por Weiss e Piper (1992).

Para os tratamentos com lâminas de água maiores que necessário, o modelo apresentou uma pequena diferença entre os valores simulados e os experimentais, tendo os valores simulados sido superiores.

Nas Tabelas 4 e 5 encontram-se as médias das variáveis simuladas com os dados da lâmina de água precipitada em cada coletor e os dados simulados com a lâmina de água média de cada tratamento, respectivamente. As variáveis simuladas apresentaram pequenas diferenças entre os valores simulados, para as duas situações, exceção para o tratamento L2B, pois as variações na lâmina aplicada no tratamento proporcionaram maiores valores simulados em alguns pontos dentro do tratamento, o que propiciou uma maior média da variável simulada do que quando a simulação foi efetuada com lâmina de água média aplicada, pois esta foi insuficiente para promover um crescimento adequado da cultura.

**Tabela 4.** Valores médios de produtividade (kg ha<sup>-1</sup>), matéria seca (MS) (kg ha<sup>-1</sup>) e índice de área foliar (IAF) das simulações com valores de lâminas aplicadas em cada coletor, para todos os tratamentos.

Variáveis	Tratamentos							
	L1A	L1B	L2A	L2B	L3A	L3B	L4A	L5A
MS	11135	10230	4474	3823	9702	7781	14167	15371
Prod	5186	4659	306	252	4666	3393	6947	7709
IAF	2,44	2,02	0,62	0,52	1,55	1,03	3,41	3,44

**Tabela 5.** Valores médios de produtividade (kg ha<sup>-1</sup>), matéria seca (MS) (kg ha<sup>-1</sup>) e índice de área foliar (IAF) das simulações para os tratamentos, com as lâminas médias aplicadas em cada tratamento.

Variáveis	Tratamentos							
	L1A	L1B	L2A	L2B	L3A	L3B	L4A	L5A
MS	11548	10603	4577	3421	9743	7606	14354	14900
Prod	5564	4870	90	87	4716	3390	7340	7649
IAF	2,10	2,00	0,90	0,95	1,59	1,24	3,41	3,59

Nas Tabelas 5 e 6 estão os dados simulados e os experimentais, respectivamente, considerando apenas os dados do bloco 3 do experimento de campo (Figura 1). Para os tratamentos em que ocorreu déficit hídrico acentuado, como nos tratamentos L2A e L2B, o modelo subestimou a produtividade da cultura do milho. Mas quanto à matéria seca total, o valor simulado pelo modelo aproximou-se do valor experimental, pois o modelo penaliza a fotossíntese e a expansão celular,

utilizando um fator que é a relação entre a umidade do solo no perfil explorado pelas raízes da cultura e a transpiração desta. No entanto, esse fator aproximou-se de 1, que é o valor máximo, após a cultura apresentar determinado crescimento, razão pela qual a produtividade foi insignificante nesses dois tratamentos, e o valor da matéria seca total simulada aproximou-se do valor experimental, pois quando se aproxima da fase de floração da cultura, o fator de penalização faz com que o modelo cesse as simulações e a cultura não entra na fase de enchimento de grãos.

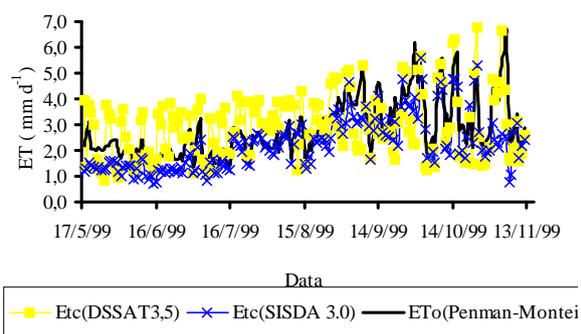
**Tabela 6.** Valores médios de produtividade( kg ha<sup>-1</sup>), matéria seca(MS)( kg ha<sup>-1</sup>) e índice de área foliar (IAF para os dados experimentais do bloco 3.

Variáveis	Tratamentos							
	L1A	L1B	L2A	L2B	L3A	L3B	L4A	L5A
MS	12986	8846	4261	4261	8003	5735	12702	13690
Prod	6038	4675	2474	3.233	4475	3170	6360	6413
IAF	1,90	1,51	0,90	0,95	1,32	1,20	2,08	2,41

Para os tratamentos em que a lâmina de água foi superior à adequada, o modelo superestimou os valores da produtividade, do índice de área foliar e da matéria seca total (Tabelas 5 e 6).

**Evapotranspiração da cultura, calculada pelo CERES-Maize e SISDA 3.0**

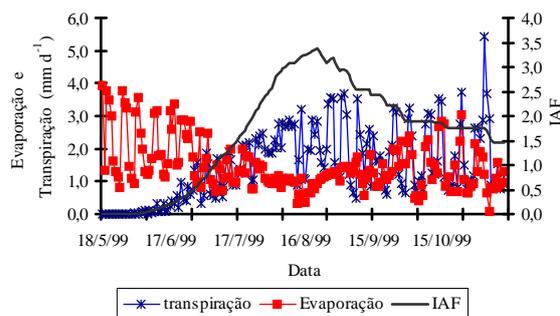
Analisando a Figura 2 (Tratamento L1A), observa-se que, para o período de maio até o início do mês de setembro, a evapotranspiração da cultura calculada pelo modelo CERES-Maize superou a evapotranspiração de referência calculada pela equação de Penman-Monteith. A partir dessa data, as evapotranspirações da cultura calculadas pelas duas metodologias são praticamente iguais.



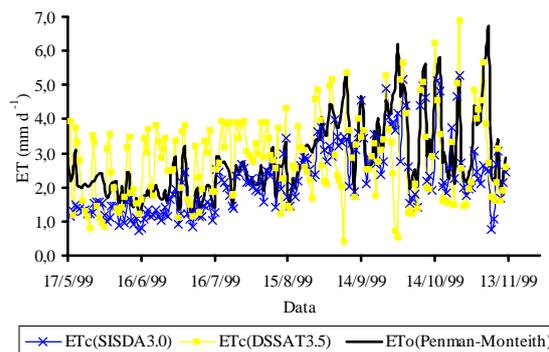
**Figura 2.** Evapotranspiração da cultura calculada pelo SISDA 3.0, DSSAT 3.5, para o tratamento L1A.

O índice de área foliar máximo para o tratamento foi de 3,37. Nesse ponto ocorreu a menor evaporação da água do solo, mas a partir desse valor iniciou-se o processo de senescência (Figura 3) e a evaporação tornou-se, novamente, um componente

importante da evapotranspiração. Observa-se, na Figura 4, que após o início do processo de senescência a evaporação da água do solo apresentou valores altos, da ordem de 3 mm d<sup>-1</sup>, o que ocorreu após a realização de uma irrigação. Mas quando o valor do IAF estava no máximo ou próximo deste, a evaporação apresentou poucas variações, mesmo após uma irrigação.



**Figura 3.** Evaporação da água no solo, transpiração da cultura e IAF calculados pelo DSSAT 3.5(B) para o tratamento L1A.



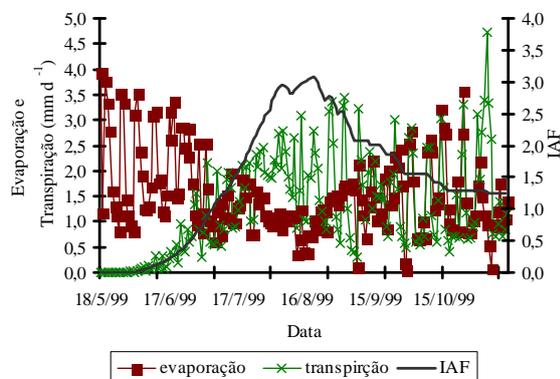
**Figura 4.** Evapotranspiração da cultura calculada pelo SISDA 3.0, DSSAT 3.5 e ETo (Penman-Monteith)(A) para o tratamento L1B.

Na Figura 4 (tratamento L1B) observa-se a redução abrupta na evapotranspiração da cultura em três datas (7, 28 e 29 de setembro), calculada pelo modelo. Entretanto, essas variações na evapotranspiração da cultura não foram observadas no tratamento L1A (Figura 3), calculadas pela mesma metodologia. Analisando o arquivo de saída do modelo para essa variável, não foi possível identificar a razão de tais quedas abruptas na evapotranspiração da cultura.

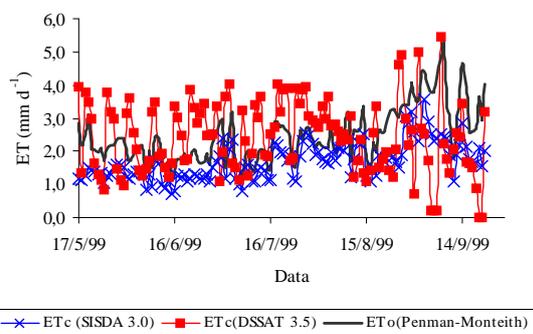
A evaporação da água do solo e a transpiração da cultura ocorrida nos tratamentos L1A e L1B foram 264,9 e 258,7 mm; e 272,3 e 228,3 mm, respectivamente, durante o ciclo da cultura (Figuras 3 e 5).

Os valores índice de área foliar máximo para os tratamentos foram 3,37 e 3,09, para os tratamentos L1A (Figura 3) e L1B (Figura 5), respectivamente. Essa

diferença nos valores de IAF, para os dois tratamentos, influenciou relativamente mais a transpiração do que a evaporação da água do solo (Figura 6).



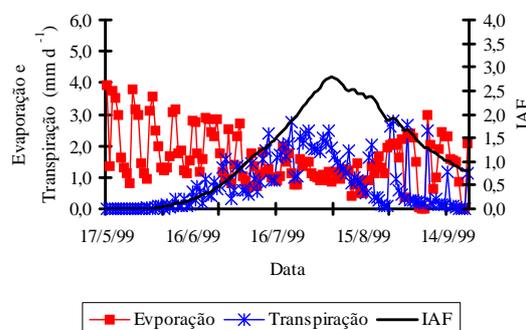
**Figura 5.** Evaporação da água no solo, transpiração da cultura e IAF calculados pelo DSSAT 3.5(B) para o tratamento L1B.



**Figura 6.** Evapotranspiração da cultura (SISDA 3.0) (—), evapotranspiração da cultura (DSSAT 3.5) (—) e ETo (Penman-Monteith) (—), para o tratamento L2A.

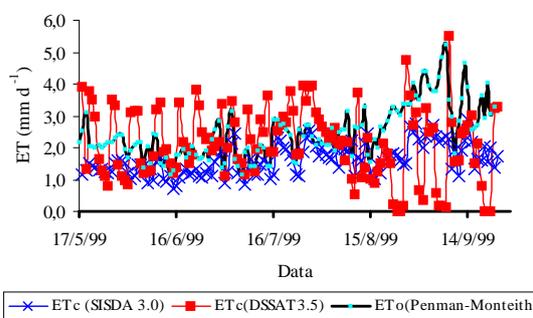
Para o tratamento L2A, a evapotranspiração da cultura calculada pelo modelo CERES-Maize, nos dias 4, 5 e 6 de setembro, apresentou valores próximos de zero, tendo a evaporação da água do solo apresentado valor igual a zero; nos dias 19 e 20 os valores foram zero, devendo-se destacar que no dia seguinte a evapotranspiração da cultura calculada pelo modelo apresentou o valor de  $3,18 \text{ mm d}^{-1}$ . No dia 31 de agosto, a evaporação da água do solo e a transpiração foram  $2,38$  e  $2,64 \text{ mm d}^{-1}$ , respectivamente. Mas para o dia 1º de setembro a transpiração diminuiu para  $0,27 \text{ mm d}^{-1}$  e a evaporação da água do solo elevou-se para  $2,41 \text{ mm d}^{-1}$ , tendo sido aplicada uma lâmina de água de  $11 \text{ mm}$  no dia 1º de setembro. A transpiração permaneceu com valores baixos, da ordem de  $0,27 \text{ mm d}^{-1}$ , até o dia 6 de setembro. No dia 7 de setembro a transpiração atingiu o valor de  $2,48 \text{ mm d}^{-1}$ , e no dia seguinte diminuiu para  $0,18 \text{ mm d}^{-1}$ . Foi realizada uma irrigação no dia 8 de setembro, com uma lâmina de água de  $12 \text{ mm}$ .

O índice de área foliar máximo para o tratamento L2A foi de  $2,8$  (Figura 7) e a evaporação da água do solo e a transpiração da cultura foram  $203,2$  e  $103,8 \text{ mm}$ , respectivamente, em um período de  $128$  dias, pois o déficit hídrico impossibilitou o modelo de completar o ciclo da cultura.



**Figura 7.** Evaporação da água no solo (—), transpiração da cultura (—) e IAF (—) calculados pelo DSSAT 3.5, para o tratamento L2A.

Para os tratamentos L2A e L2B, os valores da evapotranspiração da cultura, calculados pelo modelo, apresentaram variações abruptas em virtude do déficit hídrico (Figuras 6 e 8). O comportamento da transpiração da cultura no tratamento L2B, no qual foram obtidos valores próximos de zero em algumas datas, foi o mesmo do tratamento L2A (Figura 7).



**Figura 8.** Evapotranspiração da cultura (SISDA 3.0) (—), evapotranspiração da cultura (DSSAT 3.5) (—) e ETo (Penman-Monteith) (—), para o tratamento L2B..

O índice de área foliar máximo para o tratamento L2B foi de  $2,11$  (Figura 9) e a evaporação da água do solo e a transpiração da cultura foram  $195,1$  e  $78,0 \text{ mm}$ , respectivamente, em um período de  $130$  dias, pois o déficit hídrico também impossibilitou o modelo de completar o ciclo da cultura.

Para o tratamento L3A, a evapotranspiração da cultura calculada pelo modelo não apresentou reduções abruptas como as ocorridas nos tratamentos L2A e L2B (Figuras 6 e 8).

O índice de área foliar máximo para o tratamento

L3A foi de 2,76 e a evaporação da água do solo e a transpiração da cultura foram 264,9 e 258,7 mm, respectivamente.

O índice de área foliar máximo para o tratamento L3B foi de 2,34 (Figura 13) e a evaporação da água do solo e a transpiração da cultura foram 294,34 e 158,03 mm, respectivamente.

As diferenças na evaporação da água do solo e na transpiração, nos tratamentos L3A e L3B (Figuras 10 e 12), ocorreram em razão dos crescimentos diferenciados da cultura do milho nos dois tratamentos, consequência da aplicação de lâmina de água no tratamento L3A de 308 mm e no L3B de 258 mm, fazendo com que a produtividade simulada fosse de 4.060 e 2.952 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Essa diferença na lâmina de água aplicada influenciou o crescimento da cultura. Na Figura 11 observa-se que a transpiração apresentou valores superiores aos da evaporação da água do solo, no entanto, para o tratamento L3B, a evaporação apresentou valores superiores aos da transpiração para quase todo o ciclo da cultura.

No tratamento L4A, a cultura não foi submetida ao déficit hídrico e a evapotranspiração da cultura calculada pelo modelo superestimou a evapotranspiração de referência, calculada por meio da equação de Penman-Monteith para quase todos os dias do ciclo da cultura, sendo mais evidente até 5 de setembro, quando o índice de área foliar atingiu o valor máximo (Figura 14).

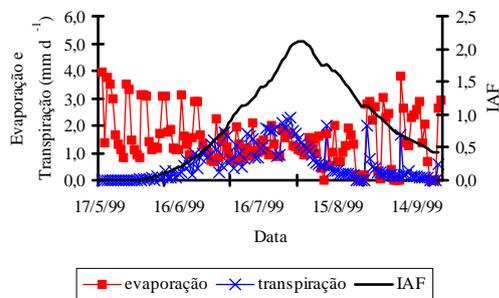


Figura 9. Evaporação da água no solo (—), transpiração da cultura (—) e IAF (—) calculados pelo DSSAT 3.5, para o tratamento L2B.

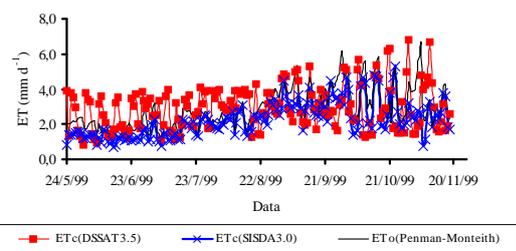


Figura 10. Evapotranspiração da cultura (SISDA 3.0) (—), evapotranspiração da cultura (DSSAT 3.5, —) e ET<sub>o</sub> (Penman-Monteith) (—), para o tratamento L3A.

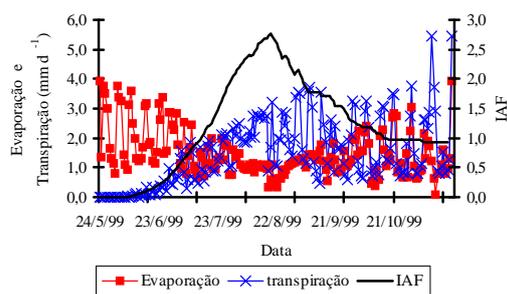


Figura 11. Evaporação da água no solo (—), transpiração da cultura (—) e IAF (—) calculados pelo DSSAT 3.5, para o tratamento L3A.

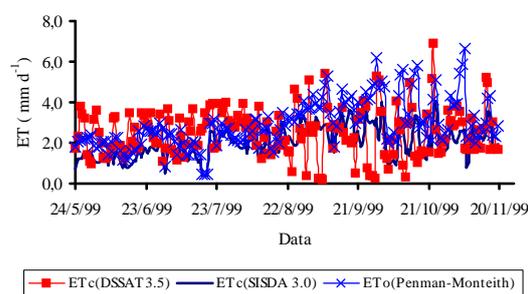


Figura 12. Evapotranspiração da cultura (SISDA 3.0) (—), evapotranspiração da cultura (DSSAT 3.5) (—) e ET<sub>o</sub> (Penman-Monteith) (—), para o tratamento L3B.

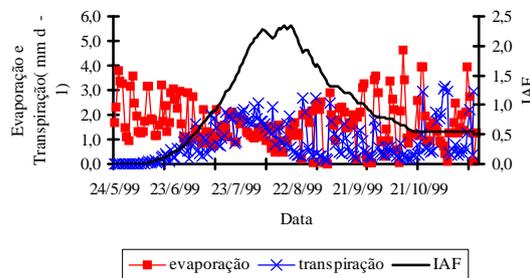


Figura 13. Evaporação da água no solo (—), transpiração da cultura (—) e IAF (—) calculados pelo DSSAT 3.5, para o tratamento L3B.

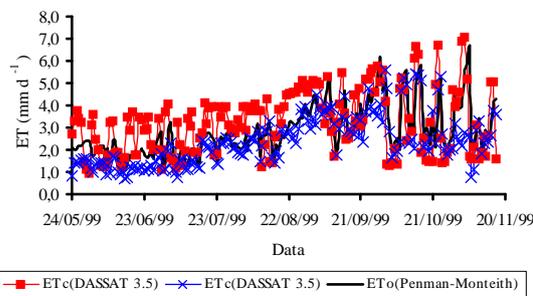
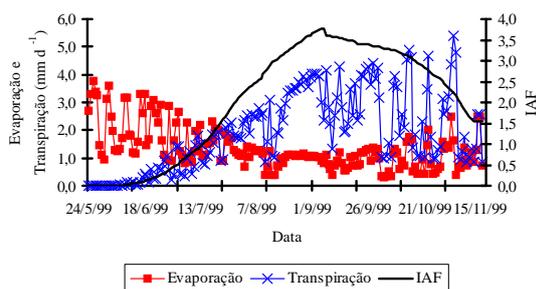
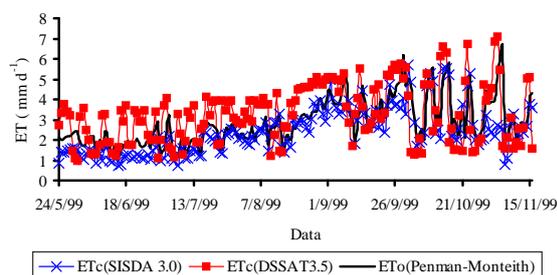


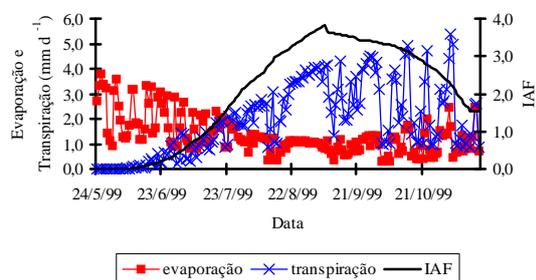
Figura 14. Evapotranspiração da cultura (SISDA 3.0) (—), evapotranspiração da cultura (DSSAT 3.5) (—) e ET<sub>o</sub> (Penman-Monteith) (—), para o tratamento L4A.



**Figura 15.** Evaporação da água no solo (—), transpiração da cultura (—) e IAF (—) calculados pelo DSSAT 3.5, para o tratamento L4A.



**Figura 16.** Evapotranspiração da cultura (SISDA 3.0) (—), evapotranspiração da cultura (DSSAT 3.5, —) e ETc (Penman-Monteith) (—), para o tratamento L5A.



**Figura 17.** Evaporação da água no solo e transpiração da cultura calculados utilizando o DSSAT 3.5, para o tratamento L5A.

O índice de área foliar máximo para o tratamento L4A foi de 3,77 e a evaporação da água do solo e a transpiração da cultura, acumuladas, foram 238,7 e 336,4 mm, respectivamente. A evaporação da água do solo ocorrida no tratamento L3B foi 23% superior e a transpiração da cultura foi 47% da ocorrida no tratamento L4A (Figuras 15 e 16). O maior índice de área foliar proporcionou um aumento considerável na transpiração e uma pequena redução na evaporação da água do solo. No tratamento L4A, o índice de área foliar atingiu o máximo no dia 5 de setembro; a partir dessa data iniciou-se o processo de senescência, e o índice de área foliar atingiu 50% do valor máximo em 7 de novembro, após 64 dias. Para o tratamento L3B, o

índice de área foliar atingiu o máximo no dia 16 de agosto e 50% do seu valor em 18 de setembro, 34 dias após atingir o valor máximo. A penalização imposta pelo modelo em razão do déficit hídrico acelerou o processo de senescência, para o tratamento L3B (Figura 13).

O índice de área foliar máximo para o tratamento L5A foi de 3,83 e a evaporação da água do solo e a transpiração da cultura foram 239,18 e 339,72 mm, respectivamente (Figura 17). O índice de área foliar máximo ocorreu no dia 6 de setembro; a partir dessa data iniciou-se o processo de senescência, e o índice de área foliar atingiu 50% do valor máximo no dia 8 de novembro, 64 dias após ter atingido o valor máximo.

Analisando a Tabela 7, observa-se que a evaporação da água do solo variou de 41% a 71% da evapotranspiração da cultura, tendo a relação mínima ocorrido para os tratamentos L4A e L5A. Para os tratamentos em que ocorreu maior déficit hídrico, o modelo não simulou até completar o ciclo da cultura, ou o crescimento da cultura foi pequeno, propiciando um baixo índice de área foliar e, conseqüentemente, maior evaporação da água do solo e menor transpiração cultura.

**Tabela 7.** Valores de evaporação, transpiração e evapotranspiração da cultura calculados pelo DSSAT 3.5 e de evapotranspiração da cultura e de referência calculados pelo SISDA 3.0.

Tratamento	Evaporação (mm/ciclo)	Transpiração (mm/ciclo)	ETc (DSSAT 3.5) (mm/ciclo)	ETc (SISDA 3.0) (mm/ciclo)	ETo (mm/ciclo)
L1A	264,91	258,74	523,74	403,24	505,25
L2A	203,25	103,85	308,09	216,71	317,54
L3A	264,91	258,74	523,74	399,95	510,05
L4A	238,69	336,41	575,17	423,20	505,31
L5A	239,18	339,72	578,97	424,25	505,31
L1B	272,29	228,26	500,49	404,76	508,12
L2B	195,88	78,05	273,93	210,38	322,59
L3B	294,34	158,03	452,39	359,23	521,23

A evapotranspiração da cultura calculada pelo modelo foi superior à evapotranspiração da cultura calculada pela equação 37 para todos os tratamentos e também superou a evapotranspiração da cultura de referência para os tratamentos em que não ocorreu déficit hídrico (Tabela 7). O cálculo da evapotranspiração da cultura pela metodologia proposta por Ritchie (1972) faz com que o modelo superestime as necessidades hídricas da cultura.

## Conclusão

A partir dos resultados obtidos após as simulações, e com base nas condições em que foi realizado o presente trabalho, pode-se concluir:

- O modelo penalizou severamente a produtividade da cultura para os tratamentos em que ocorre déficit hídrico acentuado.

- Para os tratamentos em que houve aplicação de lâmina de água superior à lâmina de água adequada, o modelo apresentou valores pouco superiores aos experimentais da produtividade, do índice de área foliar e da matéria seca total.
- Para os tratamentos L1B e L3B, em que a uniformidade de aplicação de água foi em torno de 67%, a produtividade experimental foi reduzida. Como o modelo penaliza a fotossíntese e a expansão celular, apresentou consistência com os dados experimentais da produtividade.
- A evaporação da água do solo e a transpiração da cultura calculada pelo modelo CERES-Maize superestimaram a evapotranspiração da cultura, de referência calculada pela equação de Penman-Monteith.
- A evapotranspiração da cultura calculada por essa metodologia fez com que o modelo superestimasse as necessidades hídricas da cultura.

## Referências

- GEDANKEN, A. *Utilização do modelo CERES-Maize para avaliar estratégias de irrigação em duas regiões de Minas Gerais*. 1998. (Dissertação de Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.
- HOOK, J.E. Using crop models to plan water withdraws for irrigation in drought years. *Agric. Syst.*, Oxford, v.45, n.3, p.271-289, 1994.
- IBSNAT. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer – project 1989a. Documentantion for IBSNAT Crop Models Input & Output Files Version 1.1: for the decision duupport dystem for agrotechnology transfer (DSSAT V. 2.1). IBSNAT project, Honolulu: University of Hawaii, 1989a. 61p.
- JONES, C.A.; KINIRY, J. R. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. College Station: Texas A&M University Press, 1986. 194p.
- JONES, J. W.; RITCHIE, J. T. Crop growth models. In: HOFFMAMN, G.L. *et al.* (Ed.). *Management of farm irrigation system*. S.L., 1990. P.63-89.
- KOVACS, G. J. *et al.* Testing simulation models for the assessment of crop production and nitrate leaching in Hungary. *Agric. Syst.*, Oxford, v.49, p.385-397, 1995.
- LETEY, J. *et al.* Optimun crop water as affected by uniformity of water infiltration. *Agron. J.*, Madison., v.76, p.435-441, 1984.
- LIMA, M. G. *Calibração e validação do modelo CERES-Maize em condições tropicais do Brasil*. 1995. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1995..
- MANTOVANI, E. C.; COSTA, L. C. SISDA: Sistema de Suporte à Decisão Agrícola. IN: CONGRESSO DA SBIAGR-AGROSOFT, 1, Belo Horizonte, 1997. *Anais...* Belo Horizonte: 1997. p. 5.
- PANG, X. P. *et al.* Irrigation quantity and uniformity and nitrogen application effects on crop yield and nitrogen leaching. *Soil Sci.*, Baltimore, v.61, p.257-261, 1997.
- 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.
- PLANTUREUX, S. *et al.* Evaluation and sensitivity analysis of the CERES-Maize model conditions Alsaciennes. *Agronomie*, Paris, v.11, p.1-8, 1991.
- THORNTON, P. K. *et al.* A computer program for geostatistical and spatial analysis of crop model outputs. *Agron. J.*, Madison., v.89, p.620-627, 1997.
- WAFULA, B. M. Applications of crop simulation in agricultural extension and research in Kenya. *Agric. Syst.* Oxford, v.49, n.4, p.399-412, 1995.
- WEISS, A.; PIPER, E. L. Modifying the response to defoliation during vegetative growth in CERES-Maize. *Agric. Syst.*, Oxford, v.40, n.4, p.379-392, 1992.

Received on August 23, 2003.

Accepted on February 09, 2005.