

SIMULAÇÃO DE UM CICLO DA CULTURA DA MELANCIA UTILIZANDO O SOFTWARE SWET¹

ANDRE HERMAN FREIRE BEZERRA^{2*}, SÉRGIO LUIZ AGUILAR LEVIEN³

RESUMO - A irrigação por gotejamento superficial é um dos métodos mais eficientes na aplicação de água por poder fornecer água às plantas numa taxa mais próxima a da demanda hídrica da cultura. Por isso, tem-se demandado muitos esforços na tentativa de se estimar a quantidade de água necessária às plantas. Dessa forma, o estudo da extração de água do solo pelas plantas, aliado à modelagem matemática para a predição de fenômenos e aos recursos computacionais para a realização de cálculo matemáticos complexos num curto espaço de tempo, se torna uma alternativa poderosa e necessária no entendimento e quantificação dos processos envolvidos. Realizou-se simulações com a finalidade de se estimar o coeficiente de cultivo (K_c) da melancia na região de Mossoró-RN, utilizando-se um modelo macroscópico de extração de água pelas raízes que resolve, em três dimensões, o termo de extração de água da equação de Richards. Os resultados das simulações foram comparados com os de um experimento que estimou o K_c da melancia utilizando lisímetro de pesagem. A comparação entre os resultados do modelo e do experimento apresentaram boa concordância em todos os índices estatísticos utilizados, indicando que o modelo pode servir como ferramenta de predição de transpiração e evaporação de água do solo sob as condições avaliadas, e como uma ferramenta de auxílio no manejo da irrigação.

Palavras-chave: Movimento de água no solo. Coeficiente de cultivo. Evapotranspiração. Modelagem computacional.

SIMULATION OF A CYCLE OF WATERMELON CROP USING SWET SOFTWARE

ABSTRACT - Drip irrigation is one of the most efficient methods for applying water to a crop, capable of delivering water at a rate close to the demand. Many efforts have been required to estimate the amount of water needed by plants. Therefore studying soil water extraction by plants linked to mathematical modeling for behavior prediction, and linked to computational resources to allow complex mathematical procedures to be realized in a short space of time, becomes a powerful and necessary alternative for the understanding and quantification of the involved processes. Simulations were performed through a computational model, with the purpose of estimating the crop coefficient (K_c) of watermelon in the region of Mossoró-RN, using a three-dimensional macroscopic root water uptake model, which solves the sink term of the Richards equation. The simulation results were compared with an experiment that estimated the K_c using lysimeter. The results of K_c estimated by the model showed a good agreement with lysimeter results in all chosen statistical indexes, indicating that the model can serve as a tool for predicting transpiration and evaporation of soil water under certain conditions, and as a tool to aid the irrigation management.

Keywords: Soil water movement. Crop coefficient. Evapotranspiration. Computational modeling.

*Autor para correspondência.

¹Recebido para publicação em 03/02/2012; aceito em 24/02/2014

Trabalho de Dissertação de Mestrado em Irrigação e Drenagem (UFERSA) do primeiro autor

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, bolsista CNPq, ESALQ/USP, Piracicaba, SP, e-mail: andre.herman@yahoo.com

³Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, UFERSA, Mossoró, RN, e-mail: sergiolevien@ufersa.edu.br

INTRODUÇÃO

O desperdício da água na agricultura é um problema que tem demandado muitos esforços para solucioná-lo. Mesmo com todos os avanços tecnológicos, a agricultura vem utilizando uma quantidade de água muito acima da necessária em muitos de seus setores produtivos. O manejo da irrigação é uma das ferramentas necessárias para a redução desse desperdício de água na produção agrícola e, nesse contexto, estudos envolvendo a evapotranspiração das culturas se fazem necessários.

Dentre os diferentes métodos de irrigação, a microirrigação (ou irrigação localizada) é o método de maior eficiência na aplicação de água. Em algumas partes do mundo, a microirrigação é denominada de irrigação localizada para enfatizar que somente uma parte do volume de solo é molhada. Devido ao seu aspecto localizado, há na microirrigação implicações no que diz respeito a evaporação, transpiração, percolação profunda, água no solo, nutrientes e salinidade com relação à posição espacial da cultura e distribuição de raízes (PIZARRO, 1987).

O conhecimento da distribuição de água no volume molhado sob irrigação por gotejamento é essencial na determinação de quanto e quando irrigar. O uso de modelos para descrever ou estimar a distribuição de água no volume molhado pode ser uma importante alternativa na definição do manejo da irrigação, permitindo, até mesmo, antecipar resultados de produção para diferentes opções de manejo (COELHO; OR; SOUZA, 1999).

Como um dos fatores mais importantes para o crescimento da planta e seu funcionamento é o fornecimento adequado de água, tem-se demandado muitos esforços na tentativa de quantificar a água necessária às plantas que, em circunstâncias normais, é um balanço entre a extração de água pelas raízes e a taxa de transpiração através das folhas (ROOSE; FOWLER, 2004).

Uma das formas de se estimar essa quantidade de água é através da estimativa da evapotranspiração e do coeficiente de cultivo (K_c). O método mais eficiente de se estimar o K_c é com a utilização de lisímetros que, por pesagem ou drenagem, quantificam a quantidade de água perdida para a atmosfera em um dado espaço. Os lisímetros podem ser bastante precisos, se bem construídos e calibrados, chegando a estimar a evapotranspiração em curtos períodos de tempo, como horas ou minutos. O cálculo do K_c dual (ALLEN et al., 1998) trata distintamente os componentes evaporação e transpiração dando a possibilidade de estimá-los separadamente.

Este trabalho tem como objetivo comparar os resultados do coeficiente de cultivo simulados através de um modelo desenvolvido por Bezerra (2012) com os resultados de um experimento que utilizou lisímetro para a determinação desse coeficiente.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização das simulações, foi utilizado o SWET (Soil Watermov ementand Evapo Transpiration software), desenvolvido por Bezerra (2012), e seus resultados foram comparados com dados de um experimento realizado com melancia utilizando lisímetria (FIGUEIRÊDO et al., 2009) na região de Mossoró-RN.

A modelagem do movimento de água no solo, sob condições de irrigação por gotejamento superficial, utilizada neste trabalho foi desenvolvida e validada por Souza (2009). O modelo proposto por Bezerra (2012) incluiu a quantificação da evaporação da água do solo e da transpiração da cultura. Foi utilizado o método dos volumes finitos na resolução numérica da equação de Richards para a simulação do movimento de água no solo. Utilizaram-se equações já desenvolvidas na literatura para abordar a transpiração e a evaporação, adequando-as para utilização em volumes finitos e modificando-as, quando necessário, para adaptá-las ao modelo proposto neste trabalho. Um software foi desenvolvido com a finalidade de se realizar as simulações de movimento de água, formação do bulbo molhado e quantificação da transpiração e da evaporação.

No modelo, a região do solo em que se encontra o volume de solo molhado (bulbo) foi dividida em quatro partes iguais, sendo o domínio representado por um quarto desse volume de solo. Como o método dos volumes finitos foi utilizado para resolver a equação de Richards, o domínio foi discretizado em volumes de controle (ou células) formando uma malha de elementos contíguos.

Cada volume de controle tem comprimento, largura e altura definidos por Δx , Δy e Δz , respectivamente, obtendo-se uma quantidade fixa de elementos em cada direção com coordenadas X, Y e Z representadas pelos índices i, j e k. Tem-se, dessa forma, uma matriz de M x N x P elementos, onde M, N e P representam a quantidade de elementos nas direções X, Y e Z, respectivamente. O ponto P representa o centróide de cada volume, sendo representativo da umidade em toda a célula (Figura 1).

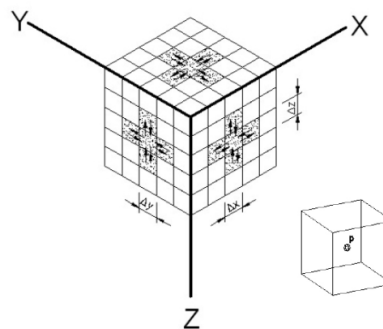


Figura 1. Esquema do domínio dividido em volumes de controle; à direita, o ponto P localizado no centróide de cada volume de controle.

A equação de Richards, considerando o solo um meio poroso, estável e isotrópico, nas três dimensões do espaço, tem a seguinte forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(\theta) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(\theta) \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad (1)$$

Após realizada a discretização do domínio em volumes de controle de coordenadas i, j e k e adicionando o termo de extração de água (S), a equação (1) torna-se:

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \left[K_{MED_x}(\theta) \frac{\Delta(\Delta H_x)}{(\Delta x)^2} + K_{MED_y}(\theta) \frac{\Delta(\Delta H_y)}{(\Delta y)^2} + K_{MED_z}(\theta) \frac{\Delta(\Delta H_z)}{(\Delta z)^2} \right] - S_{(x,y,z,t)} \quad (2)$$

em que K_{MED_x} , K_{MED_y} , K_{MED_z} , são as condutividades hidráulicas médias entre células adjacentes nas direções X, Y e Z, respectivamente, e ΔH é a variação do potencial hidráulico.

O termo de extração (S) da equação (2) representa a evaporação de água na superfície do solo e a transpiração das plantas através da extração de água pelas raízes, conforme a equação:

$$S = E_{(x,y,t)} + T_{(x,y,z,t)} \quad (3)$$

em que E é a evaporação de água na superfície do solo, e T a transpiração da planta.

Considera-se que a evaporação só ocorre na primeira camada de células (quando $k = 0$). A transpiração ocorre a partir da segunda camada de células (quando $k \geq 1$) pois considera-se que as raízes capazes de absorver água não se encontram na camada superficial do solo.

Utilizou-se uma equação que apresenta um comportamento do tipo senoidal para se obter a distribuição da ET_o ao longo do dia, ou seja, a taxa de evapotranspiração:

$$ET_{o_s} = \frac{ET_{o_d}}{t_f - t_i} \left[1 - \cos \left(\frac{2 \pi (t - t_i)}{t_f - t_i} \right) \right] \quad \text{para } t_i \leq t \leq t_f \quad (4)$$

onde ET_{o_d} e ET_{o_s} são, respectivamente, a evapotranspiração diária e a taxa de evapotranspiração a cada segundo; t_i e t_f representam o tempo, em segundos, em que a ET_o inicia e termina durante o dia, respectivamente. Para $t < t_i$ e $t > t_f$, considera-se evapotranspiração nula.

A taxa de evaporação e de transpiração de uma célula genérica de coordenadas i, j e k são representadas pelas seguintes equações, respectivamente:

$$E_{i,j,k} = K_r (1 - fc^*) K_x \frac{ET_{o_s}}{M \cdot N} \quad (5)$$

$$T_{i,j,k} = K_{f_{i,j,k}} fc^* K_{cb} \frac{ET_{o_s}}{N_r} \quad (6)$$

em que K_r é o coeficiente de redução da evaporação; fc^* é o fator de cobertura ajustado para efeitos de microadvecção (RAES et al., 2009; RAES et al., 2011); K_x é o coeficiente da evaporação máxima do solo; K_f é o

coeficiente de redução da transpiração e K_{cb} é o K_c basal da cultura. A relação $\frac{ET_{o_s}}{M \cdot N}$ e $\frac{ET_{o_s}}{N_r}$ representam as taxas de evaporação e a transpiração potencial de uma célula em um determinado tempo. $M \cdot N$ é a quantidade de células da primeira camada, que está sujeita à evaporação, e N_r é o número de células que apresenta raiz.

A umidade do solo a ser extraída por evaporação e por transpiração, em um determinado tempo, são representadas pelas seguintes equações, respectivamente:

$$\theta_{E_{i,j,k}} = \frac{E_{i,j,k} \Delta x \Delta y}{\Delta x \Delta y \Delta z} = \frac{E_{i,j,k}}{\Delta z} \quad (7)$$

$$\theta_{T_{i,j,k}} = \frac{T_{i,j,k} \Delta x \Delta y}{\Delta x \Delta y \Delta z} = \frac{T_{i,j,k}}{\Delta z} \quad (8)$$

A umidade final da célula em um determinado tempo é calculada através da seguinte equação:

$$\theta_{i,j,k}^{t+\Delta t} = \theta_{i,j,k}^t + \Delta\theta_{i,j,k} - (\theta_{E_{i,j,k}} + \theta_{T_{i,j,k}}) \quad (9)$$

em que $\theta_{i,j,k}^{t+\Delta t}$ é a umidade da célula no tempo atual; $\theta_{i,j,k}^t$ é a umidade da célula no tempo anterior; $\Delta\theta_{i,j,k}$ é a variação de umidade da célula, indicando se houve perda ou ganho de água; e $\theta_{E_{i,j,k}}$ e $\theta_{T_{i,j,k}}$ são as umidades extraídas do solo por evaporação e transpiração, respectivamente.

O coeficiente de cultivo (K_c) de um volume de controle genérico, em um determinado tempo, é estimado por:

$$K_c = \frac{E_{i,j,k} + T_{i,j,k}}{ET_o_s} \quad (10)$$

Os resultados da simulação com o modelo foram avaliados usando os seguintes índices: coeficiente de correlação (r), erro dos quadrados médios (EQM), erro absoluto médio (EAM), erro relativo médio (ERM), índice D de ajuste, definido por Willmott (1982), e eficiência do modelo (EM), definido por Nash e Sutcliffe (1970). Os índices são dados por:

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum(O_i - E_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2}} \quad (11)$$

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (E_i - O_i)^2} \quad (12)$$

$$EAM = \frac{1}{n} \sum |O_i - E_i| \quad (13)$$

$$D = 1 - \frac{\sum(O_i - E_i)^2}{\sum(|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (14)$$

$$ERM = \frac{1}{n} \sum \left(\frac{E_i - O_i}{O_i} \right) \quad (15)$$

$$EM=1-\frac{\sum(O_i-E_i)^2}{\sum(O_i-\bar{O})^2} \quad (16)$$

onde E_i corresponde ao valor estimado pelo modelo; O_i corresponde ao valor observado experimentalmente (ou estimado pelo modelo considerado padrão); e \bar{O} é o valor médio entre os dados observados.

O valor de r é uma medida de bondade de ajuste da relação entre os valores do coeficiente de cultivo estimados pelo modelo e os valores observados experimentalmente. SQM e EAM são indicadores de erro cumulativo nas simulações, e não consideram se o erro é positivo ou negativo. ERM mostra a diferença relativa do erro pelo modelo, levando em conta se este foi devido ao excesso ou não, e compensa erros de sinal diferente. Para os índices D e EM, quanto mais próximo da unidade, mais similares são os valores previstos pelo modelo para os observados experimentalmente. A diferença entre eles é que, enquanto D só pode assumir valores entre 0 e 1, EM pode assumir ainda valores negativos, significando que a média dos dados observados predizem melhor os resultados que os estimados pelo modelo (ARBAT et al., 2003).

O software(SWET) simula o movimento da água no solo, considerando a extração de água pelas raízes e a evaporação na superfície do solo, de acordo com as equações propostas no modelo. Os cálculos para a obtenção da umidade final da célula são realizados a cada passo de tempo considerado, cujo seu valor mínimo é de um segundo.

Na comparação do modelo com o lisímetro, foram realizadas sete simulações de 12 horas cada, representando sete dias do experimento realizado por Figueirêdo et al. (2009), para comparação. Os dias escolhidos foram: dois dias na fase inicial, dois na fase de desenvolvimento, dois na fase intermediária e um na fase final (dia que antecede a colheita). Os dados de entrada do modelo para a realização das simulações podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Dados de entrada do modelo utilizados nas sete simulações.

Dado	Valor							Unidade
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	
Θ_r				0,0485				$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
Θ_s				0,3904				$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
Θ_{cc}				0,10351				$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
Θ_{pmp}				0,0517				$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
Ψ_{ini}				300				Cm
K_s				4,38015				cm h^{-1}
A				0,03473				cm^{-1}
M				0,42747				-
N				1,74663				-
Vazão do emissor				1,6				L h^{-1}
Tempo de aplicação de água	0,88	0,95	2,5	2,31	3,48	3,35	1,59	h
Tempo de simulação				12				h
Δt				1				s
Tamanho do domínio nas 3 dimensões				50				cm
Tamanho da célula nas 3 dimensões				2				cm
Tipo de Solo				Areia				-
Cultura				Melancia				-
Estádio de desenvolvimento	I	I	II	II	III	III	IV	-
Prof. Radicular	20	20	30	40	40	40	40	cm
Altura média da planta	10	10	20	40	40	40	40	cm
E_{To}	5,87	6,35	6,87	6,38	6,05	5,82	5,48	mm
U.R. mínima	53,01	34,07	39,63	50,01	49,1	50,92	51,77	%
Vel. Vento	2,65	1,96	2,1	2,43	1,21	1,77	0,95	m s^{-1}

* Θ_r, Θ_s , são as umidades residual e de saturação, respectivamente; Ψ_{ini} é o potencial matricial inicial do solo; K_s é a condutividade hidráulica saturada; α , m e n são os parâmetros da equação de retenção de van Genuchten (1980); Δt é o passo de tempo;

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 são mostrados os resultados do coeficiente de cultivo estimados pelo lisímetro. Um K_c médio foi ajustado de acordo com os procedimen-

tos descritos em Allen et al. (1998), a fim de se obter uma melhor visualização da duração dos estádios de desenvolvimento, além do próprio K_c médio de cada fase.

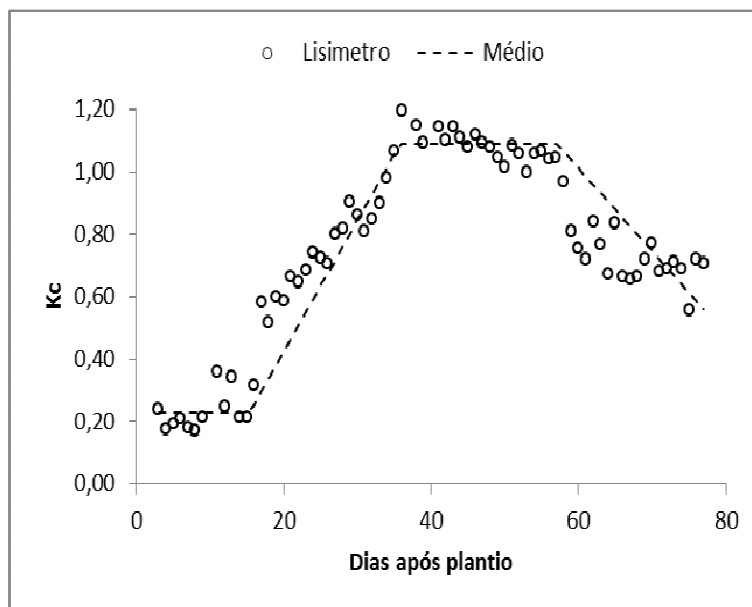


Figura 2. Valores de K_c obtidos por lisímetro de pesagem em função do tempo após plantio.

Devido à falta de dados experimentais de umidades do perfil do solo ao início das irrigações, assumiu-se, durante as simulações, a umidade inicial do solo na capacidade de campo, o que não necessariamente condizia com a realidade do experimento, mas que pode ser justificada pelo alto índice pluviométrico registrado na região durante a execução do experimento (827,7 mm - quantidade acima da média para a região). O tempo de aplicação de água foi

calculado, portanto, para complementar a quantidade de água necessária à cultura para cada dia escolhido, de acordo com a evapotranspiração de referência (ET_0), chuva e vazão do gotejador simulada ($1,6 \text{ Lh}^{-1}$). O modelo não simula escoamento superficial nem percolação profunda, o que pode explicar, em parte, as diferenças entre o calculado pelo modelo e o medido por lisímetro, como pode ser visualizado na Figura 3.

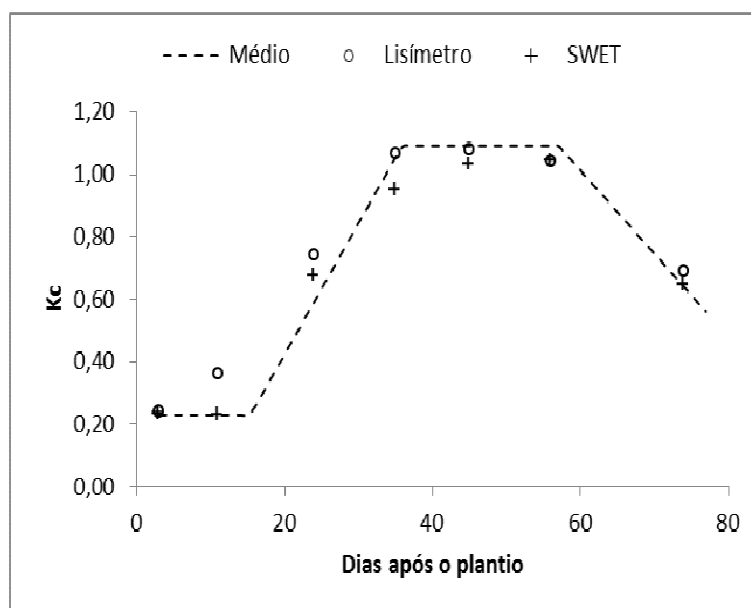


Figura 3. Valores de K_c obtidos pelo lisímetro e estimados pelo modelo em função do tempo após plantio.

É mostrado na Tabela 2 os resultados dos índices estatísticos utilizados na avaliação do modelo. Percebe-se um bom ajuste entre os valores de K_c simulados e os medidos pelo lisímetro quando se observa o coeficiente de correlação igual a 0,97 (Figura 4). Os valores dos erros dos quadrados médios, absoluto médio e relativo médio foram baixos, com valores de 0,075; 0,059 e 0,098 respectivamente,

mostrando uma boa aproximação entre os valores de K_c estimados e observados. O índice D de ajuste e a eficiência do modelo (EM), com valores iguais a 0,987 e 0,945 respectivamente, indicam a acurácia do modelo nas simulações realizadas para esse cenário. Logicamente, novas simulações, com diferentes cenários, devem ser feitas com a finalidade de se por à prova o potencial do modelo desenvolvido.

Tabela 2. Índices de comparação entre resultados observados e estimados.

Simulação	r	EQM	EAM	ERM	D	EM
SWET	0.973	0.075	0.059	0.098	0.987	0.945

Os resultados mostram que, para o cenário estudado, o modelo simulou a extração de água pela cultura da melancia com uma exatidão similar à ocorrida no campo (mensuradas por lisímetro de pesagem). Isso indica que o modelo pode ser utilizado como uma ferramenta ao manejo da irrigação, ao

passo que se é possível realizar cálculos de lâminas de irrigação mais eficientes quando se tem valores de K_c ajustados para as condições edafoclimáticas à qual se cultiva. Mostra também, o potencial dos modelos em prever e estimar os fenômenos naturais e os parâmetros físicos que os regem sem a necessidade

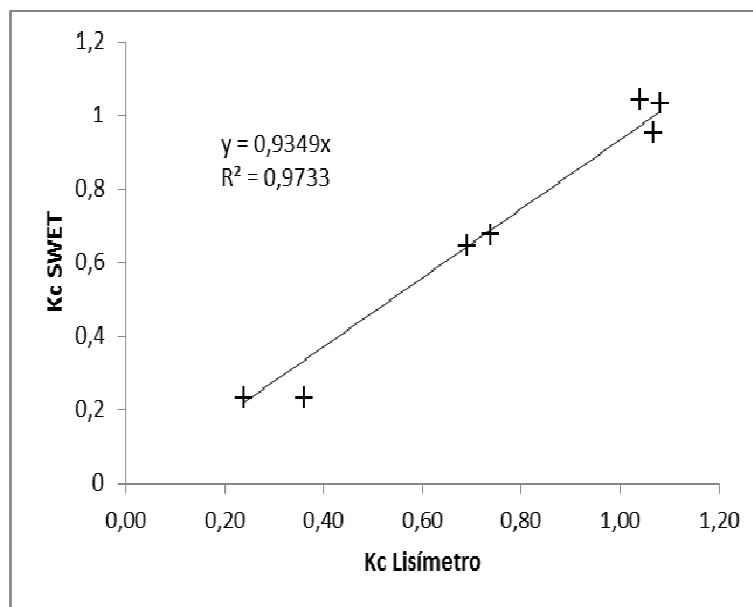


Figura 3. Regressão linear entre K_c medido por lisímetro e pelo modelo.

CONCLUSÃO

O modelo, apesar de não considerar escoamento superficial e percolação profunda, calcula satisfatoriamente o coeficiente de cultivo (K_c) através da estimativa da extração de água pelas raízes da planta e evaporação de água na superfície do solo. O software (SWET) desenvolvido para a execução do modelo pode, portanto, servir como uma ferramenta de auxílio ao manejo da irrigação.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements.** Rome: FAO, 300p., 1998. (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 56).

ARBAT, G. et al. Evaluación de los modelos numéricos de flujo de agua en el suelo HYDRUS-2D y SIMDAS enriego localizado. In: ÁLVAREZ-BENEDÍ, J.; MARINERO, P. **Estudios de la zona no saturada del suelo.** v. 6, p. 279-288, 2003.

BEZERRA, Andre Herman Freire. **Modelagem do movimento de água no solo sob condições de irri-**

gação por gotejamento superficial considerando absorção radicular e evaporação de água do solo 2012. 104f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, RN, 2012.

COELHO, E.F.; OR, D.; SOUSA, V.F. Avaliação de parâmetros hidráulicos para modelos de distribuição de água no solo sob gotejamento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.4, p.651-657, 1999.

FEDDES, R.A. et al. Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function. **Journal of Hydrology**, v.31, p.13-26, 1976.

FIGUEIRÊDO, V.B. et al. Evapotranspiração da cultura da melancia irrigada com água de diferentes salinidades. **Engenharia Agrícola**, v.29, n.2, p.231-240, 2009.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models, I, A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282-290, 1970.

PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia: goteo, microaspersión, exudación**. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. 1987. 459 p.

RAES, D. et al. **Aquacrop**: reference manual. Chapter 3: Calculation procedures, version 3.1 plus, 2011. 98p.

RAES, D. et al. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 438-447, 2009.

ROOSE, T.; FOWLER, A.C. A model for water uptake by plant roots. **Journal of Theoretical Biology**, n. 228, p. 155-171, 2004.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, n. 44, p. 892-898, 1980.

VRUGT, A.J.; HOPMANS, J.W.; SIMUNEK, J. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. **Soil Science Society of America Journal**, v.65, n.4, p.1027-1037, 2001.

WILLMOTT, C.J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, n. 63, p.1309-1313, 1982.