

MODELO DINÂMICO DE ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO DA ÁGUA EM SOLO NÃO-ESTRATIFICADO E SEM VEGETAÇÃO^{1/}

Gilberto C. Sediyama^{2/}
Sérgio Marcos de A. Carvalho^{2/}
Paulo Afonso Ferreira^{2/}
Salassier Bernardo^{2/}

1. INTRODUÇÃO

O movimento da água na direção solo-atmosfera envolve, entre outras variáveis, a velocidade do vento, a umidade relativa do ar, a radiação emitida e recebida pela superfície, a profundidade do sistema radicular, o uso consuntivo da cultura ao longo do seu desenvolvimento e as propriedades físicas do solo. Percebe-se, então, que o solo, a planta e a atmosfera constituem um sistema com alto grau de complexidade.

Vários modelos de simulação têm sido propostos para estimar as inter-relações da água no solo, sem vegetação, e a atmosfera. Nesses modelos são usados, em geral, os seguintes dados de entrada: lámina evaporada em tanque Classe A, lámina precipitada, velocidade do vento, saldo de radiação e propriedades físicas do solo, tais como condutividade hidráulica não-saturada e difusividade.

HANKS *et alii* (7) investigaram a influência do gradiente de temperatura sobre a evaporação da água do solo. Para tanto, submeteram as colunas de solo, em laboratório, a gradientes de temperaturas de diferentes intensidades e direções. Na presença de vento, o gradiente de temperatura foi alto inicialmente, tendendo a zero com o passar do tempo, ao passo que no tratamento com radiação solar ocorreu o inverso. Os resultados indicaram que a presença de vento produz, em geral, maior evaporação. Estimativas de evaporação, com o uso da equação diferencial da difusão, supondo condições isotérmicas, forneceram valores que variaram cerca de $\pm 10\%$, em relação aos valores medidos.

^{1/} Aceito para publicação em 1-03-1988.

^{2/} Departamento de Engenharia Agrícola da U.F.V. 36570 Viçosa, MG.

REYNOLDS e WALKER (14) desenvolveram e testaram, num período de oito dias, um modelo matemático, para simular a evaporação em colunas de solo de pequenas dimensões. Esse modelo usa a difusividade como função exponencial do teor de umidade e tem por base a equação diferencial da difusão. Os incrementos de tempo e profundidade são variáveis, o que contribui para reduzir o tempo de processamento. Nos testes realizados com o modelo, verificou-se que os melhores resultados foram obtidos quando as camadas do solo tinham menores espessuras próximo à superfície, embora o aumento da espessura das camadas, nas regiões mais profundas, não tivesse comprometido as estimativas.

Estimativas da evaporação potencial e da evaporação real em solo sem vegetação são fornecidas pelo modelo matemático proposto por van BAVEL e HILLEL (2), tendo como dados de entrada as propriedades físicas do solo e dados meteorológicos. Os dados meteorológicos necessários são os seguintes: radiação recebida na superfície, temperatura do ar e velocidade do vento. As condições de contorno, para o final do perfil considerado, foram: fluxo de calor igual a zero e gradiente de umidade também igual a zero. Como condição inicial, supõe-se que a umidade do solo seja constante, conforme a profundidade. A temperatura, também conforme a profundidade, é considerada constante e igual à temperatura média do dia em que se inicia a simulação.

Segundo GARDNER e GARDNER (5), as estimativas de evaporação que empregam a equação diferencial da difusão, em condições de laboratório, têm levado a bons resultados. Entretanto, os valores encontrados no campo estão, em geral, sujeitos a maiores desvios, em relação aos valores medidos. Tais desvios estão ligados ao fato de que, no início do processo evaporativo, dificilmente o teor de umidade ao longo do perfil será uniforme, além de se ter uma redistribuição de umidade ao longo desse perfil.

Os resultados obtidos com a equação diferencial da difusão, tomando a difusividade como constante, são, em geral, bem diferentes do que se observa experimentalmente. Além disso, a difusividade é pouco sensível à temperatura (3).

A fidelidade das estimativas feitas com a equação diferencial da difusão, acerca do movimento da água no solo, depende, dentre outros fatores, da precisão com que a difusividade é obtida (3, 6, 7, 10, 11).

Os modelos que simulam o movimento da água no solo utilizam, freqüentemente, a equação diferencial da difusão. GARDNER (4) usou essa equação para estimar a evaporação em colunas de solo dispostas verticalmente, tendo como condições de contorno uma profundidade finita para a frente de umedecimento e um teor de umidade constante ao longo dessa frente. Os valores obtidos com a equação, quando comparados com os medidos, foram considerados satisfatórios, visto que, entre eles, a variação máxima da evaporação acumulada foi de 6,5%. Quanto à exigência de alta demanda evaporativa no início do processo de evaporação, afirma-se que não deve ser muito menor do que 7,5 mm por dia.

O acompanhamento da evaporação da água do solo, de várias profundidades, em base diária, pelos métodos convencionais, consome tempo e mão-de-obra. Desse modo, tem-se tentado monitorar sistemas complexos, como é o caso do sistema solo-planta-atmosfera, através de modelos dinâmicos que simulem tais sistemas. O desenvolvimento desses modelos, de modo geral, ocorre por etapas, procurando-se estudar as inter-relações dos vários componentes do sistema. No sistema referido, é de fundamental importância conhecer o valor da evaporação na ausência de sorvedouros (plantas), ou seja, antes de utilizar o sistema, como um todo, devem-se avaliar as suas partes.

No Brasil, o desenvolvimento de modelos dinâmicos que simulam a evapora-

ção no sistema solo-atmosfera tem recebido pouca atenção.

Tendo em vista o potencial de uso de tais modelos, o presente trabalho teve os seguintes objetivos:

a) estabelecer um modelo dinâmico de estimativa da evaporação da água em solo não-estratificado e sem vegetação, em base diária, e

b) validar o modelo, pela confrontação dos resultados simulados com os dados de evaporação da água do solo determinados por meio de modelos físicos de campo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Modelo Dinâmico

O desenvolvimento do modelo dinâmico utilizado na simulação foi baseado nos critérios e suposições apresentados por JONES e VERMA (9).

O estado de umidade do solo variou no tempo, conforme as precipitações, evaporação, difusividade e seu teor de umidade inicial. A seguinte expressão relacionou as variáveis descritas anteriormente em pontos discretos no perfil:

$$\theta(M) = f[P, E, \theta_i(M), D], \quad \text{eq. 1}$$

sendo:

$\theta(M)$ = umidade volumétrica do solo no ponto M, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;

M = ponto no perfil do solo;

P = precipitação diária, mm;

E = evaporação diária, mm;

$\theta_i(M)$ = umidade volumétrica inicial do solo no ponto M, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;

D = difusividade da água no solo, $\text{cm}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$.

O perfil do solo foi dividido em camadas, separadas uma da outra pela distância ΔZ . Essas camadas foram numeradas de 0, 1, 2, ..., M, ..., K, de modo que a profundidade de uma camada qualquer, era dada por $Z = M \cdot \Delta Z$.

O fluxo ascendente de água no solo foi estimado pela equação diferencial da difusão:

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = D \frac{\delta^2 \theta}{\delta Z^2} \quad \text{eq. 2}$$

em que:

D = difusividade da água no solo, em $\text{cm}^2 \text{ dia}^{-1}$;

t = tempo, dia;

A solução adotada para a equação 2 é semelhante à proposta por REICHARDT e GODOI (13):

$$\begin{aligned} \theta(M, t+1) &= \theta(M, t) - \left[\frac{\Delta t}{(\Delta Z)^2} \right] \left\{ D_{(M+1/2)}, t^{[\theta(M+1), t - \theta(M), t]} \right. \\ &\quad \left. - D_{(M-1/2), t} [\theta(M), t - \theta(M-1), t] \right\} \end{aligned} \quad \text{eq. 3}$$

em que:

$\theta(M,t)$ = umidade na camada M, no tempo t, $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$;

$D(M \pm 1/2, t)$ = difusividade para camadas adjacentes, no tempo t, $\text{cm}^2\text{dia}^{-1}$;

t = incremento de tempo, dia;

Essa solução está sujeita à seguinte condição:

Se $\theta(M, t) < \theta(M-1, t)$, então $\theta(M, t) = \theta(M-1, t)$. Fixado o valor de Z, obtém-se o valor de t, de modo que $D \cdot t / (\Delta Z)^2 \leq 1/2$, satisfazendo-se o critério de estabilidade da solução.

Foram utilizados três diferentes critérios para calcular o valor da difusividade, para camadas adjacentes, na solução anteriormente apresentada, a saber:

- critério adotado por van der PLOEG e BENECKE (12);
- critério adotado por ASHCROFT *et alii* (1);
- critério adotado por HANKS e BOWERS (8).

A evaporação da água no solo foi considerada em dois estádios, conforme GARDNER (3). O primeiro estádio, de taxa constante, ocorrerá quando as seguintes condições forem satisfeitas:

- $\theta(0) >$ umidade do ar
- $EP \leq \theta_i(0) [\Delta Z/2]$
- $PU < 0,0$

Nesse caso, a evaporação da água do solo é igual à evaporação potencial. Para calcular o novo perfil de umidade, utilizaram-se as seguintes equações:

$$\cdot \theta(0) = \theta_i(0) - EP [\Delta Z/2], \text{ para } M = 0 \quad \text{eq.4}$$

$$\cdot \theta(M) = \theta_i(M), \text{ para } M > 0, \quad \text{eq. 5}$$

ao passo que o segundo estádio, de taxa decrescente, ocorrerá quando $PU \leq 0$ e qualquer uma das condições seguintes for verdadeira:

- $\theta_i(0) =$ umidade do ar;
- $EP > \theta_i(0) [\Delta Z/2]$.

Nesse caso, a perda de umidade do solo é estimada pela equação diferencial da difusão e a evaporação total é dada pela seguinte expressão:

$$EV_t = \Delta Z \left\{ \frac{[\theta_i(0) - \theta(0)] + [\theta_i(K) - \theta(K)]}{2} + \sum_{M=1}^{K-1} [\theta_i(M) - \theta(M)] \right\} \quad \text{eq. 6}$$

As condições de contorno, para a equação da difusão, foram as seguintes:

$\theta(0) =$ umidade do ar;

$$\frac{\delta \theta(K)}{\delta Z} = 0,0$$

A evaporação em um dia não pode ser maior do que a evaporação potencial para esse dia. Quando a evaporação for maior do que a evaporação potencial, a

razão (R) da equação a seguir será menor do que 1,0:

$$R = \frac{EP - [\theta_1(0) - \theta(0)] \cdot (\Delta Z/2)}{\Delta Z \left\{ \frac{\theta_1(K) - \theta(K)}{2} + \sum_{M=1}^{K-1} [\theta_1(M) - \theta(M)] \right\}} < 1,0 \quad \text{eq. 7}$$

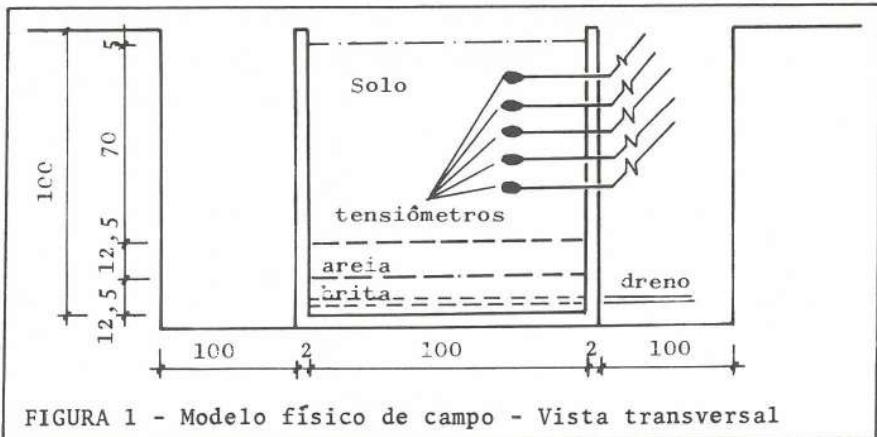
2.2. Modelo Físico de Campo

O modelo físico de campo foi montado na área experimental do Departamento de Engenharia Agrícola, no campus da UFV. O material de solo utilizado na confecção desse modelo foi coletado na profundidade de 0 a 50 cm, nas proximidades da Vila Prof. Secundino, no campus da UFV.

O modelo (Figura 1) foi construído a partir de uma caixa de madeira de 2x1x1 m. Essa caixa foi colocada no centro de uma escavação feita no solo (2x2x1 m), de modo que a sua superfície coincidiu com a superfície do solo ao seu redor. As paredes internas e o fundo foram impermeabilizados com lona plástica, para que não ocorressem infiltrações. Numa das paredes da caixa, de 2,0 m de comprimento, foram feitos, rentes ao fundo, três furos, com 5,4 cm de diâmetro. Por esses orifícios foram introduzidos tubos de PVC, com diâmetro interno de 5,0 cm e 150 cm de comprimento, de forma que 50,0 cm de cada tubo ficasse do lado de fora da caixa. Os 100,0 cm que ficaram no interior da caixa, com declividade para fora, foram perfurados, para recolhimento da água de drenagem. Sobre esses tubos colocou-se uma camada de brita zero, com 12,5 cm de altura, e sobre esta uma camada de areia lavada, de igual altura, garantindo-se, desse modo, boa drenagem ao sistema.

Com o objetivo de monitorar o potencial matricial da água no perfil do solo, foram instalados cinco tensiômetros, nas profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm, relativas à superfície do solo na caixa.

As leituras da altura da coluna de mercúrio, para cada tensiômetro, em base diária, foram feitas sempre entre as 7 e as 9 horas, com vistas na minimização do efeito da temperatura. Antes de cada leitura, por volta das 17 horas, era feita uma escorva em cada tensiômetro, para a retirada de possíveis bolhas de ar do interior do sistema.



3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante 48 dias, de dois de maio a 19 de junho de 1986, foram feitas leituras diárias do potencial matricial no modelo físico de campo. Os valores desse potencial foram convertidos em umidade, em percentagem de volume.

O modelo dinâmico foi escrito em forma de programa de computador, em linguagem BASIC, e implementado num microcomputador. Esse modelo forneceu, em base diária, a variação do teor de umidade de acordo com a lâmina evaporada em tanque Classe A e com as precipitações ocorridas. As estimativas feitas foram confrontadas com os valores de umidade medidos no campo. Os parâmetros básicos de entrada do modelo foram a umidade de saturação (θ_s), a umidade do solo seco ao ar (θ_a), o incremento de profundidade (ΔZ) e o valor da difusividade para camadas adjacentes ($D_{M\pm 1/2}$). Esse último parâmetro, conforme a codificação do Quadro 1, foi variado, para se verificar a sensibilidade do modelo dinâmico.

O Quadro 2 apresenta a lâmina evaporada no modelo físico de campo para as cinco camadas trabalhadas, bem como para o perfil como um todo, para diversos períodos. No Quadro 3 encontra-se a lâmina evaporada em todo o perfil, obtida a

QUADRO 1 - Parâmetros utilizados no modelo dinâmico

Código dos parâmetros	Parâmetros	Unidade
a	$\theta_s = 0,31$	$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$
	$\theta_a = 0,003$	$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$
	$Z = 2,0$	cm
(padrão)	$D_{M\pm 1/2,t} = (D_{M,t} + D_{M\pm 1,t})/2$ (Van der PLOEG e BENECKE)	$\text{cm}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$
b	Padrão com: $D_{M\pm 1/2,t} = D((\theta_{M,t} + \theta_{M\pm 1,t})/2)$ (ASHCROFT et alii)	$\text{cm}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$
c	Padrão com: $D_{M\pm 1/2,t} = \frac{\theta_{M,t} - \theta_{M\pm 1,t}}{\sum D(\theta)} \cdot \frac{\theta_a}{\theta_{M,t} - \theta_{M\pm 1,t}}$ (HANKS e BOWERS)	$\text{cm}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$

QUADRO 2 - Lâmina evaporada no modelo físico de campo

Profundi- dade (cm)	Lâmina evaporada (mm)				
	Períodos				
	02/05 a 12/05	13/05 a 30/05	13/05 a 19/06	02/05 a 30/05	02/05 a 19/06
0-10	17,5	18,0	19,5	35,5	37,0
10-20	5,5	6,5	9,5	12,0	15,0
20-30	3,5	4,5	7,0	8,0	10,5
30-40	3,0	3,5	5,0	6,5	8,0
40-50	2,5	2,5	3,0	5,0	5,5
Q-50 *	32,0	35,0	44,0	67,0	76,0
Q-50 **	32,5	35,5	44,5	68,0	77,0

* Considerando $\theta_a = 0,03 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$

** Considerando $\theta_a = 0,02 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$

QUADRO 3 - Lâmina evaporada, obtida a partir do modelo dinâmico, para a profundidade de 0 a 50 cm e para os parâmetros utilizados

Parâmetros	Lâmina evaporada (mm)				
	Períodos				
	02/05 a 12/05	13/05 a 30/05	13/05 a 19/06	02/05 a 30/05	02/05 a 19/06
a	29,0	34,5	42,5	63,5	71,5
b	25,5	30,0	38,0	55,5	63,5
c	33,0	41,0	67,5	74,5	100,5

partir das estimativas feitas através do modelo dinâmico, para períodos idênticos. A lâmina evaporada, tanto para o modelo físico de campo quanto para o modelo dinâmico, foi obtida na suposição de que a umidade variasse linearmente com a profundidade.

Segundo GARDNER e GARDNER (5), um dos problemas ligados ao uso de

modelos dinâmicos em situações de campo é o estabelecimento de condições iniciais de umidade reais. A maior variação percentual (Quadro 4) entre a lâmina evaporada obtida com os dados de campo e a obtida com os valores simulados ocorreu entre o 1.^º e o 10.^º dia. Esse resultado, provavelmente, está associado à imprecisão das condições iniciais de umidade do solo, visto que, a partir do 11.^º dia, quando ocorreu uma precipitação que saturou o perfil, a variação percentual foi bem reduzida. Observando o período que vai do 11.^º ao 48.^º dia, verifica-se que há uma tendência de crescimento na variação percentual, evidenciando-se as discrepâncias entre os valores medidos no campo e os estimados através do modelo dinâmico, para longos períodos sem precipitações.

QUADRO 4 - Variação percentual entre a lâmina evaporada no modelo físico de campo (LEC) e a obtida do modelo dinâmico (LES), para a profundidade de 0 a 50 cm e para os parâmetros utilizados nesse modelo

Parâmetros	Variação percentual LEC e LES (%)				
	Períodos		02/05	13/05	13/05
	02/05	13/05	13/05	02/05	02/05
a	- 9,38	- 1,43	- 3,41	- 5,22	- 5,92
b	-20,31	-14,29	-13,64	-17,16	-16,45
c	+ 3,13	+17,14	+53,41	+11,19	+32,24

A evaporação acumulada, obtida com o modelo dinâmico, para as profundidades de 0 a 10, de 10 a 20, de 20 a 30, de 30 a 40 e de 40 a 50 cm, encontra-se no Quadro 5. Observou-se, como esperado, uma redução com a profundidade.

A diferença percentual entre a lâmina evaporada obtida dos dados de campo e a obtida das estimativas feitas através do modelo dinâmico, para os intervalos de profundidades referidos, encontra-se no Quadro 6. Pode-se observar, então, que essa diferença tendeu a aumentar com a profundidade, atingindo alto valor do 1.^º ao 48.^º dia, na camada de 40 a 50 cm, o que evidencia que o modelo dinâmico, além de perder precisão com o tempo, perde-a também com o aumento da profundidade.

No Quadro 4 encontra-se, para diversos períodos, a diferença percentual entre a lâmina evaporada obtida a partir dos dados de campo e a obtida a partir das estimativas feitas através do modelo dinâmico. A perda de precisão do modelo nas estimativas da umidade reflete-se bem nesse quadro, no qual, do 1.^º ao 10.^º dia, a variação percentual passou de -9,83%, quando se usaram parâmetros tipo «a», para -20,31%, quando se usaram parâmetros tipo «b». Para os demais períodos, a variação percentual também cresceu significativamente, passando de -5,92%, quando se usaram parâmetros tipo «a», para -16,45%, quando se usaram parâmetros tipo «b», e +32,24%, quando se usaram parâmetros tipo «c».

O Quadro 6, em que está a diferença percentual entre a lâmina evaporada obtida a partir dos dados de campo e a obtida a partir das estimativas feitas através do modelo dinâmico, para os intervalos de profundidade de 0 a 10, de 10 a 20,

QUADRO 5 - Lâmina evaporada, obtida a partir do modelo dinâmico, para diversas profundidades e para os parâmetros utilizados

Parâme- tros	Prof. (cm)	Lâmina evaporada (mm)				
		Períodos			02/05	02/05
		02/05 a 12/05	13/05 a 30/05	13/05 a 19/06	02/05 a 30/05	02/05 a 19/06
a	0-10	17,0	17,5	18,0	34,5	35,0
	10-20	5,0	6,0	7,5	11,0	12,5
	20-30	3,0	4,5	6,5	7,5	9,5
	30-40	2,0	3,5	5,5	5,5	9,0
	40-50	2,0	3,0	5,0	5,0	8,0
b	0-10	16,0	16,5	17,5	32,5	33,5
	10-20	3,5	4,5	6,5	8,0	10,0
	20-30	2,5	3,5	5,5	6,0	8,0
	30-40	2,0	3,0	4,5	5,0	6,5
	40-50	1,5	2,5	4,0	4,0	5,5
c	0-10	17,0	18,0	21,0	35,0	38,0
	10-20	5,5	7,5	13,5	13,0	19,0
	20-30	4,5	6,0	12,5	10,5	15,0
	30-40	3,5	5,0	11,0	8,5	14,5
	40-50	2,5	4,5	9,5	7,0	12,0

de 20 a 30, de 30 a 40 e de 40 a 50 cm, evidencia que as maiores perdas de precisão ocorreram do 1.º ao 10.º dia, no modelo com parâmetros tipo «b». Para os demais períodos, observam-se, nesse quadro, os reflexos dos ganhos de precisão do modelo dinâmico quando se usaram parâmetros tipo «b», em vez de parâmetros tipo «a» ou «c», nas camadas mais profundas, sobretudo nas situadas no intervalo de 40 a 50 cm de profundidade.

4. RESUMO

Foi utilizado um modelo dinâmico de balanço de água, em solo sem vegetação, que fornece, em base diária, a evaporação da água do solo ao longo do perfil. Esse modelo foi escrito em forma de programa de computador, em linguagem BASIC, e implementado em microcomputador.

Para validar o modelo dinâmico, foi montado um modelo físico de campo na área experimental do Departamento de Engenharia Agrícola, no campus da UFV. O modelo físico de campo consistiu numa caixa de madeira, devidamente impermeabilizada, com as seguintes dimensões: 2x1x1 m. Nessa caixa,posta numa escavação de 2x2x1 m e com sistema de drenagem adequado, foi colocado um solo

QUADRO 6 - Variação percentual entre a lâmina evaporada no modelo físico de campo (LEC) e a obtida no modelo dinâmico, para diversas profundidades e para os parâmetros utilizados nesse modelo

Parâmetros	Prof. (cm)	Variação percentual LEC e LES (%)				
		Períodos		02/05 a 12/05	13/05 a 30/05	13/05 a 19/06
		02/05	02/05			
a	0-10	- 2,86	- 2,78	- 7,69	- 2,82	- 5,41
	10-20	- 9,09	- 7,69	- 21,05	- 8,33	- 16,67
	20-30	-14,29	0,00	- 7,14	- 6,25	- 9,52
	30-40	-33,33	0,00	+ 10,00	-15,38	+ 12,50
	40-50	-20,00	+20,00	+ 66,67	0,00	+ 45,45
b	0-10	- 8,75	- 8,33	- 10,26	- 8,45	- 9,46
	10-20	-36,36	-30,77	- 31,58	-33,33	- 33,33
	20-30	-28,57	-22,22	- 21,43	-25,00	- 23,81
	30-40	-33,33	-14,29	- 10,00	-23,08	- 18,75
	40-50	-40,00	0,00	+ 33,33	-20,00	0,00
c	0-10	- 2,86	0,00	+ 7,69	- 1,41	- 2,70
	10-20	0,00	+15,38	+ 42,11	+ 8,33	+ 26,67
	20-30	+28,57	+33,33	+ 78,57	+31,25	+ 42,86
	30-40	+16,67	+42,86	+120,00	+30,77	+ 81,25
	40-50	0,00	+80,00	+216,67	+40,00	+118,18

classificado como franco-arenoso, colhido no intervalo de profundidade de 0 a 50 cm, nas imediações da Vila Prof. Secundino, no campus da UFV. Após a acomodação do solo na caixa, sua umidade, nas profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm, foi acompanhada, através de tensiómetros, durante 48 dias, de dois de maio a 19 de junho de 1986. A difusividade da água no solo trabalhado, determinada pelo método proposto por Gardner, e outras propriedades físicas foram determinadas em laboratório.

Os dados meteorológicos de entrada no modelo dinâmico, a lâmina evaporada em tanque Classe A e as precipitações foram tomados da Estação Meteorológica do campus da UFV, situada a cerca de 900 m da área em que se montou o modelo físico de campo.

De posse dos dados meteorológicos, das propriedades físicas do solo e da variação da umidade com o tempo, procedeu-se à validação do modelo dinâmico. Procurou-se verificar também a sensibilidade do modelo à umidade do solo saturado, à umidade do solo seco ao ar e ao tamanho do incremento de profundidade, conforme a expressão usada para calcular a difusividade da água no solo para camadas adjacentes.

As conclusões foram as seguintes:

- a) a sensibilidade do modelo dinâmico, conforme os três diferentes critérios para o cálculo da difusividade, foi evidente;
- b) para longos períodos de secagem, o modelo dinâmico, com o critério de HANKS e BOWERS para calcular a difusividade, tende a superestimar a taxa de evaporação da água do solo nos seus diferentes perfis;
- c) o uso de parâmetros tipo «b» foi melhor, principalmente para as camadas mais profundas (de 40 a 50 cm), para períodos longos;
- d) de modo geral, a utilização do modelo dinâmico, com adoção do critério de van der PLOEG e BENECKE, é suficiente para fins práticos, para todas as profundidades, especialmente por ser mais simples e utilizar menor tempo de processamento.

5. SUMMARY

(A DYNAMIC MODEL FOR ESTIMATING WATER EVAPORATION FROM HOMOGENEOUS BARE SOIL)

In this study, a dynamic soil water evaporation model for estimating the daily water evaporation rate from bare soil exposed to natural weather was used and tested under field conditions.

The model proved to be sensitive to criteria for calculating soil water diffusibility. For long dry periods the model, together with criteria established by HANKS and BOWERS, demonstrably overestimated the evaporation rate. Generally speaking, the dynamic model, with the adoption of PLOEG and BENECKE criteria for calculating soil water diffusibility, is adequate for the soil layers studied.

6. LITERATURA CITADA

1. ASHCROFT, G.; MARSH, D.D.; EVANS, D.D. & BOERSMA, L. Numerical method for solving the diffusion equation: I. Horizontal flow in semi-infinite media. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 26:522-525. 1962.
2. van BAEL, C.H.M. & HILLEL, D. Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat. *Agric. Meteorol.*, 17:453-474. 1976.
3. GARDNER, W.R. Solution of the flow equation for drying of soil and other porous media. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 23:183-187. 1959.
4. GARDNER, H.R. Prediction of evaporation from homogeneous soil based on flow equation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37:513-516. 1973.
5. GARDNER, H.R. & GARDNER, W.R. Relation of water application to evaporation and storage of soil water. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 33:192-196. 1969.
6. GARDNER, W.R. & MAYHUGH, M.S. Solutions and tests of the diffusion equation for the movement of water in Soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 22:197-201. 1958.
7. HANKS, R.J.; GARDNER, W.R. & FAIRBOURN, M.L. Evaporation of water

- from soils as influenced by drying with wind or radiation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 31:593-598. 1976.
8. HANKS, R.J. & BOWERS, S.A. Numerical solution of the moisture flow equation for infiltration into layered soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 26:531-534. 1962.
 9. JONES, W.J. & VERMA, B.P. A digital simulation of the dynamic soil moisture status. *Transactions of the ASAE*, 14(4):660-664. 1971.
 10. KLUTE, A. Some theoretical aspects of the flow of water in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 16:144-148. 1952.
 11. PARKES, M.E. & WATERS, P.A. Comparison of measured and estimated unsaturated hydraulic conductivity. *Water Res. Resour.*, 16(4): 749-754. 1980.
 12. van der PLOEG, R.R. & BENECKE, P. Unsteady, unsaturated, n-dimensional moisture flow in soil: A computer simulation program. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38:881-885. 1974.
 13. REICHARDT, K. & GODOI, C.R.M. *Solução numérica de equações diferenciais parciais*. Piracicaba, CENA/ESALQ, 1973. (Boletim Didático, 12).
 14. REYNOLDS, W.D. & WALKER G.K. Development and validation of a numerical model simulating evaporation from short cores. *Soil Sci. Soc. Am. Journ.*, 48:960-969. 1984.