

## DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO NUMÉRICO PARA MODELAGEM DO BULBO MOLHADO EM IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

JOÃO BATISTA TOLENTINO JÚNIOR<sup>1</sup>; LÍGIA BORGES MARINHO<sup>2</sup>;  
CLAUDINEI FONSECA SOUZA<sup>3</sup>; JOSÉ ANTONIO FRIZZONE<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Professor Doutor, UFSC, Rod. Ulysses Gaboardi, km 3, Caixa Postal 101, CEP 89520-000, Curitibanos-SC. Fone (48) 3721-2173. Email: joao.tolentino@ufsc.br

<sup>2</sup>Professora Doutora, UNEB, Juazeiro-BA. Email: bmarinho@uneb.br

<sup>3</sup>Professor Doutor, UFSCar, Araras-SP. Email: cfsouza@cca.ufscar.br

<sup>4</sup>Professor Doutor, ESALQ/USP, Piracicaba-SP. Email: frizzone@usp.br

### 1 RESUMO

Um modelo numérico foi desenvolvido para simular a distribuição da água no perfil do solo abaixo de uma fonte pontual. A solução da equação diferencial para o movimento da água em solo não saturado foi realizada pela discretização do espaço-tempo utilizando a técnica dos volumes finitos. O volume de solo onde ocorre a infiltração da água emitida pelo gotejador foi dividido em anéis cada qual com largura  $R$  e profundidade  $Z$ . Um algoritmo em linguagem Visual Basic foi escrito para implementar um conjunto de equações que simulam a evolução do bulbo molhado com o tempo. Os dados de entrada do modelo foram a curva de retenção da água no solo (parâmetros de ajuste  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $\theta_r$  e  $\theta_s$ ), a condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ), a vazão do emissor ( $q$ ) e o conteúdo de água inicial no perfil do solo ( $\theta_{ini}$ ). Foram realizadas simulações para diferentes texturas de solo e diferentes vazões do emissor. Cada interação do modelo numérico foi realizada para um tempo de simulação de 5 segundos, e para uma distância entre os nós de 5 cm na vertical e 5 cm na horizontal. O modelo numérico proposto foi capaz de simular o bulbo molhado nas mais diferentes condições de textura e estrutura do solo e de conteúdo de água inicial.

**Palavras-chave:** Visual Basic, infiltração, água no solo.

### 2 INTRODUÇÃO

A irrigação por gotejamento é uma das tecnologias que mais rapidamente se expandem na moderna agricultura irrigada com um grande potencial para utilizar a água com eficiência. Segundo ALLEN e BROCKWAY (1984), conceitos modernos devem ser utilizados no dimensionamento de novos sistemas de irrigação, de modo a melhorar o uso e a eficiência da irrigação e permitir a maximização do lucro.

A questão crítica colocada é se as soluções atuais são boas o suficiente para resolver os desafios futuros em termos de produção sustentável de alimentos para uma população crescente com menos recursos hídricos disponíveis para o setor agrícola e com ameaça de degradação física e química do solo (BASTIAANSSEN et al., 2007). O decréscimo na disponibilidade de água para a agricultura criou a necessidade de aumentar a eficiência no uso da água, que pode ser conseguido principalmente pelo aumento da produtividade por unidade de água utilizada e pela redução das perdas e poluição da água no sistema (HATFIELD; SAUER; PRIEGER; 2001; HOWELL, 2001).

O conhecimento do movimento de água no solo em resposta a uma fonte pontual (gotejador) instalada na superfície do solo é de difícil entendimento, devido a grande complexidade do sistema solo-água. Para um bom dimensionamento da irrigação por

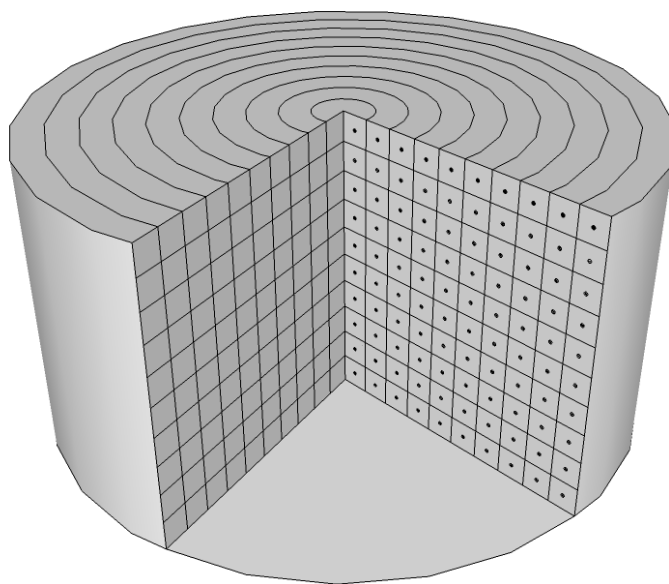
gotejamento são necessárias informações a respeito da distribuição da água sob uma fonte gotejadora em diferentes vazões do emissor e para diferentes volumes de água aplicada. Também é necessário conhecer como essa distribuição da água é afetada pelas propriedades físico-hídricas do solo. Dessa forma, é possível dimensionar o sistema de irrigação de modo a molhar um volume suficiente do solo que assegure que o requerimento de água pelas plantas seja atendido, e que este volume de solo esteja altamente relacionado com a distribuição do sistema radicular da cultura.

O bulbo molhado formado na irrigação por gotejamento pode ser modelado a partir informações das propriedades físico-hídricas do solo. O solo não saturado é um sistema altamente complexo. O processo de movimento da água nesse solo pode ser descrito através de modelos físico-matemáticos, no entanto, suas interações são altamente não lineares, o que dificulta bastante a modelagem (SIMUNEK, 2005). Muitos modelos de níveis de complexidade diferentes têm sido desenvolvidos durante as últimas décadas para quantificar o movimento da água na zona não saturada. Geralmente, os modelos são baseados nas equações que governam o movimento da água no solo, em especial a equação de Richards (MMOLAWA e OR, 2000). Mas apesar do grande progresso na modelagem, a aplicação de modelos na irrigação e drenagem ainda não foi implementada em nenhum nível de maneira substancial, nem na comunidade de pesquisa em irrigação e serviços de consultoria, nem no dimensionamento, operação e avaliação de sistemas de irrigação (BASTIAANSEN et al., 2007).

Assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo numérico utilizando a técnica dos volumes finitos para estimar a forma e as dimensões do volume de solo molhado sob irrigação por gotejamento.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Um modelo numérico foi desenvolvido para simular a distribuição da água no perfil do solo abaixo de uma fonte pontual. A solução da equação diferencial para o movimento da água em solo não saturado foi realizada pela discretização do espaço-tempo utilizando a técnica dos volumes finitos (Figura 1).



**Figura 1.** Discretização do espaço pelo método dos volumes finitos.

O volume de solo em que ocorre a infiltração da água emitida pelo gotejador foi dividido em anéis cada qual com largura R e profundidade Z. Considerando o índice “z” como endereço do anel ao longo da profundidade e o índice “r” como endereço do anel ao longo do raio, a variação de umidade em um anel em determinado intervalo de tempo pode ser descrita pela equação 1:

$$\frac{\Delta\theta_{(z,r)}}{\Delta t} = \frac{Vva_{(z,r)} - Vvb_{(z,r)} + Vhe_{(z,r)} - Vhd_{(z,r)}}{VAnel_{(z,r)}} \quad (1)$$

Em que,

$\frac{\Delta\theta_{(z,r)}}{\Delta t}$  - variação de umidade no anel (z,r) em um intervalo de tempo

$Vva_{(z,r)}$  - volume de água que adentra no anel (z,r) pela face superior

$Vvb_{(z,r)}$  - volume de água que deixa o anel (z,r) pela face inferior

$Vhe_{(z,r)}$  - volume de água que adentra no anel (z,r) pela face esquerda

$Vhd_{(z,r)}$  - volume de água que deixa o anel (z,r) pela face direita

Sendo,

$$Vva_{(z,r)} = \left( \frac{K(\theta)_{(z,r)} + K(\theta)_{(z-1,r)}}{2} \right) \left( \frac{\psi(\theta)_{(z,r)} - \psi(\theta)_{(z-1,r)} + Z}{Z} \right) \{ [rZ]^2 - [(r-1)Z]^2 \} \Delta T \quad (2)$$

$$Vvb_{(z,r)} = \left( \frac{K(\theta)_{(z+1,r)} + K(\theta)_{(z,r)}}{2} \right) \left( \frac{\psi(\theta)_{(z+1,r)} - \psi(\theta)_{(z,r)} + Z}{Z} \right) \{ [rZ]^2 - [(r-1)Z]^2 \} \Delta T \quad (3)$$

$$Vhe_{(z,r)} = \left( \frac{K(\theta)_{(z,r-1)} + K(\theta)_{(z,r)}}{2} \right) \left( \frac{\psi(\theta)_{(z,r)} - \psi(\theta)_{(z,r-1)}}{Z} \right) 2 \pi Z^2 r \Delta T \quad (4)$$

$$Vhd_{(z,r)} = \left( \frac{K(\theta)_{(z,r+1)} + K(\theta)_{(z,r)}}{2} \right) \left( \frac{\psi(\theta)_{(z,r+1)} - \psi(\theta)_{(z,r)}}{Z} \right) 2 \pi Z^2 (r+1) \Delta T \quad (5)$$

Em que,

$K(\theta)$  - condutividade hidráulica não saturada em função do conteúdo de água no solo

$\psi(\theta)$  - potencial mátrico em função do conteúdo de água no solo

R - largura do anel

Z - altura do anel

$\Delta T$  - tempo de simulação

Os valores de  $K(\theta)$  e  $\psi(\theta)$  foram calculados pelas equações de Mualem-Van Genuchten:

$$K(\theta) = Kr(\theta) Ks \quad (6)$$

$$Kr(\theta) = Se^{0.5} \left( 1 - \left( 1 - Se^{1/m} \right)^m \right)^2 \quad (7)$$

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha |\Psi_m|)^n} \right]^m \quad (8)$$

Com  $m=1-1/n$ .

As condições de contorno atribuídas foram que não há fluxo de água nas extremidades do volume estudado, ou seja:

Quando

$$z=1; \quad Vva=0$$

$$z=Z_{\text{máx}}; \quad Vvb=0$$

$$r=1; \quad Vhe=0$$

$$r=r_{\text{máx}}; \quad Vhd=0$$

Inicialmente considerou-se que toda água emitida pelo gotejador ficava armazenada no anel mais central ( $r=1$ ,  $z=1$ ). Com o passar do tempo, quando este anel atingiu a saturação, a água emitida pelo gotejador era distribuída para os anéis vizinhos, aumentando o raio da zona saturada.

Um algoritmo em linguagem Visual Basic foi escrito para implementar o conjunto de equações acima descrito e simular a evolução do bulbo molhado no tempo.

Foi simulada a formação do bulbo molhado para três tipos de matérias, conforme descritos na Tabela 1 e para três vazões de emissor: 2, 4 e 6 L/h.. Os gráficos de isolinhas de umidade foram traçados no software Surfer.

**Tabela 1.** Parâmetros da curva de retenção dos três tipos de materiais (areia, solo arenoso e solo argiloso) utilizados neste trabalho

Material	----Parâmetros da curva de retenção ----					Ks cm h <sup>-1</sup>
	$\alpha$	m	n	$\theta_s$	$\theta_r$	
Areia	0,069	0,7792	4,53	0,454	0,067	312,3
Solo Arenoso	0,199	0,351	1,542	0,412	0,121	18,2
Solo Argiloso	0,197	0,278	1,386	0,471	0,215	9,0

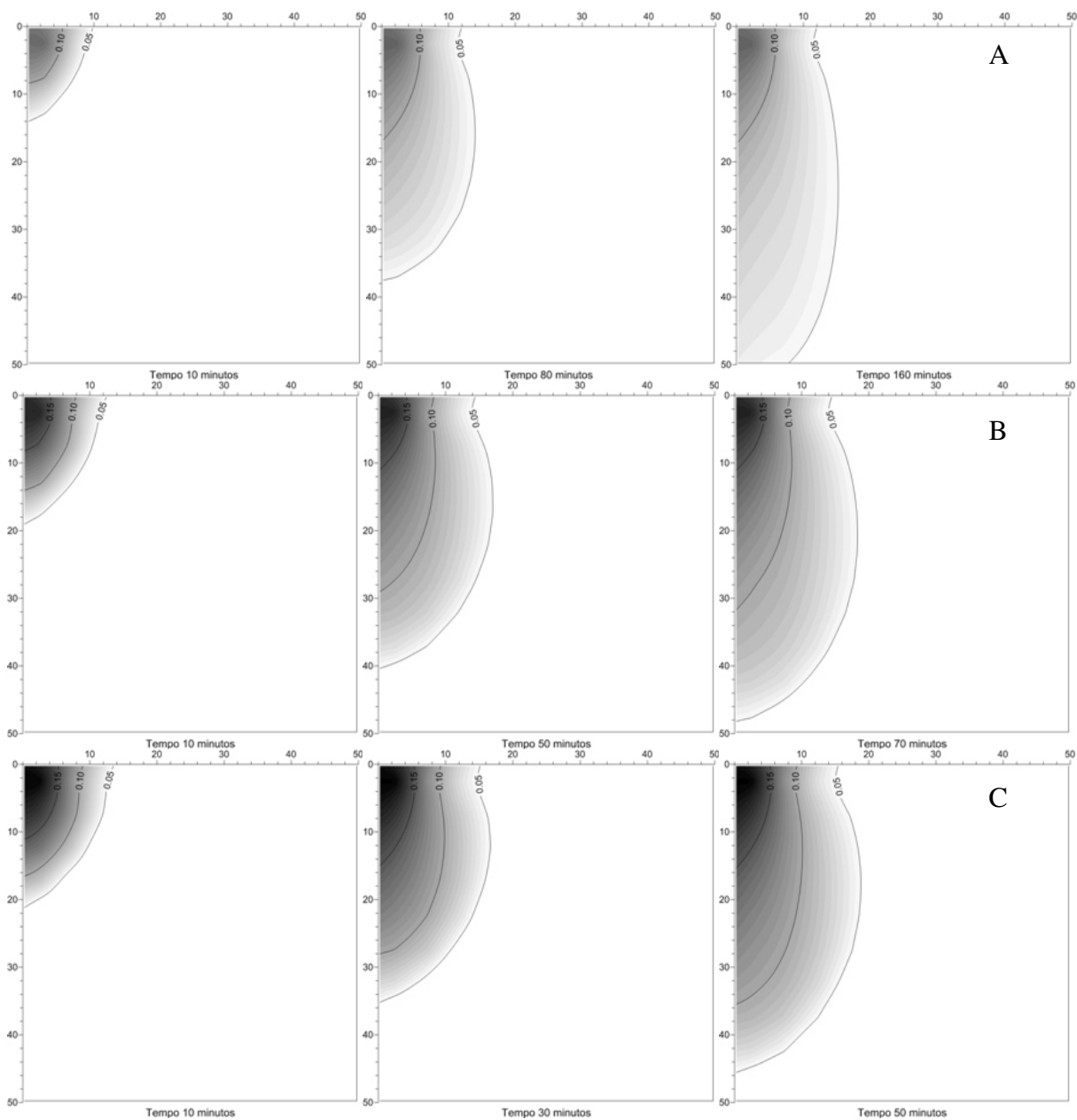
#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação à simulação do bulbo molhado, um modelo numérico utilizando a técnica dos volumes finitos foi implementado em Visual Basic para simular a formação do bulbo molhado em irrigação por gotejamento. Os dados de entrada do modelo foram a curva de retenção, representada pelos parâmetros de ajuste  $\alpha$ , m, n,  $\theta_r$  e  $\theta_s$ , a condutividade hidráulica saturada (Ks), a vazão do emissor (q) e o conteúdo de água inicial no perfil do solo ( $\theta_{ini}$ ). O conteúdo de água inicial pode ser uniforme ou variável, bastando para isso preencher a coluna correspondente a esse valor.

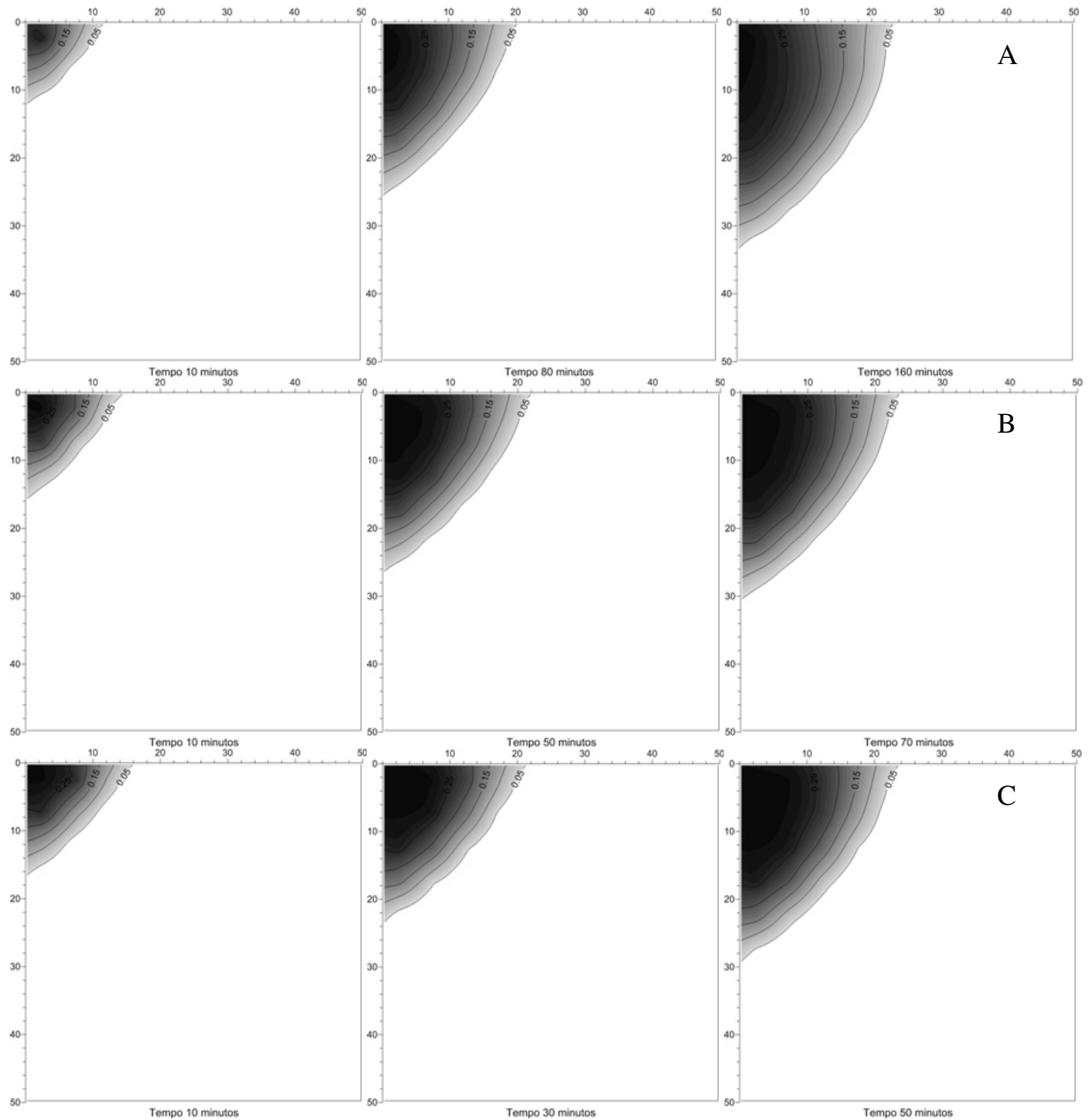
Cada interação do modelo numérico foi realizada para um tempo de simulação de 5 segundos, e para uma distância entre os nós de 5 cm na vertical e 5 cm na horizontal. Quando

o tempo de aplicação de água atingia 10 minutos, os valores de conteúdo de água eram salvos em outra planilha para depois serem processados no software Surfer.

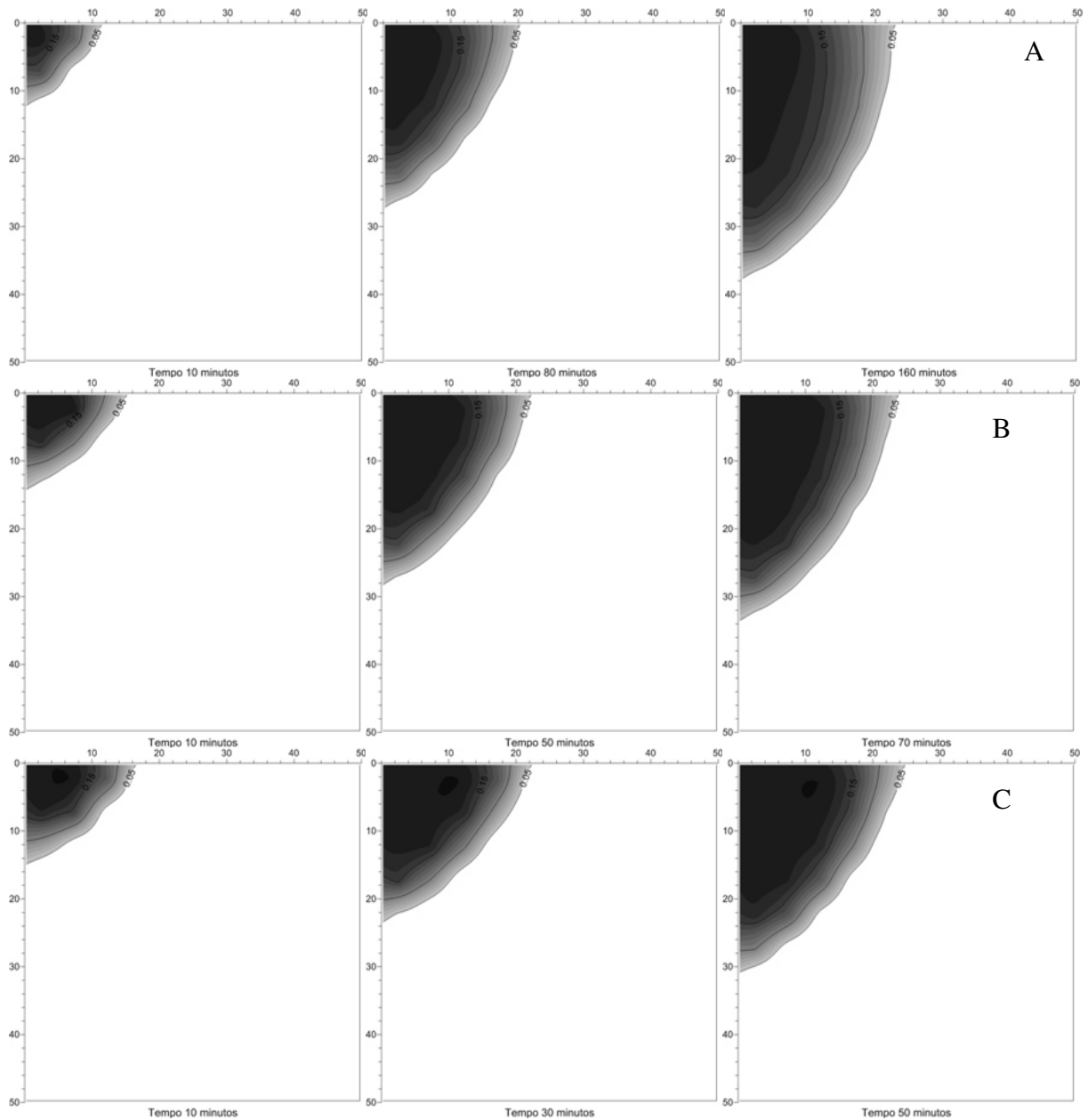
As figuras 2, 3 e 4 mostram a formação do bulbo molhado nos diferentes materiais (areia, solo arenoso e solo argiloso) nas vazões de 2, 4 e 6 L h<sup>-1</sup> obtidas a partir dos dados simulados.



**Figura 2.** Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em areia na vazão de (A) 2 L h<sup>-1</sup>, (B) 4 L h<sup>-1</sup>e (C) 6 L h<sup>-1</sup> a partir de dados simulados. A coordenada x corresponde à distância horizontal, em centímetros, do emissor e a coordenada y corresponde à distância vertical, em centímetros, do emissor.



**Figura 3.** Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo arenoso na vazão de (A)  $2 \text{ L h}^{-1}$ , (B)  $4 \text{ L h}^{-1}$  e (C)  $6 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. A coordenada x corresponde à distância horizontal, em centímetros, do emissor e a coordenada y corresponde à distância vertical, em centímetros, do emissor.



**Figura 4.** Gráficos de isolinhas de conteúdo de água volumétrico indicando a formação do bulbo molhado em solo argiloso na vazão de (A)  $2 \text{ L h}^{-1}$ , (B)  $4 \text{ L h}^{-1}$  e (C)  $6 \text{ L h}^{-1}$  a partir de dados simulados. A coordenada x corresponde à distância horizontal, em centímetros, do emissor e a coordenada y corresponde à distância vertical, em centímetros, do emissor.

Na areia, o movimento da água teve predominância no sentido vertical, formando um bulbo molhado mais profundo e com diâmetro reduzido. Para a vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$ , a profundidade do bulbo molhado chegou a 50 cm para uma largura de 20 cm no tempo de 160 min de aplicação de água. Na vazão de  $4 \text{ L h}^{-1}$  o tempo necessário para o bulbo molhado chegar as mesmas dimensões foi de 80 min, e na vazão de  $6 \text{ L h}^{-1}$  o tempo foi de 50 min. Estes resultados indicam que a vazão do emissor não afetou as dimensões do bulbo molhado, mas esta foi determinada pelo volume de água aplicado. Esta é uma característica dos materiais mais transmissíveis, como é o caso da areia em que a principal força atuante é a gravitacional em comparação com as forças de retenção. EL-HAFEDH, DAGHARU e

MAALEJ (2001) avaliaram as vazões de 2, 4 e 8 L h<sup>-1</sup> e relataram que as dimensões do bulbo molhado não dependem diretamente da vazão do emissor, mas sim do volume de água aplicado, assim como indicado por BRESLER (1977) e GHALI e SVEHLIK (1988).

Para o solo arenoso, na vazão de 2 L h<sup>-1</sup> a largura do bulbo molhado ficou em 20 cm e a profundidade foi de 38 cm no tempo de aplicação de 160 min. Na vazão de 4 L h<sup>-1</sup> as mesmas dimensões foram alcançadas no tempo de 80 min. Já na vazão de 6 L h<sup>-1</sup> o bulbo molhado foi ligeiramente menos profundo (34 cm) e mais largo (22 cm). Para este solo já é perceptível a influência da vazão do emissor na formação do bulbo molhado. Um aumento na vazão do emissor resulta em acréscimo no movimento horizontal em detrimento do movimento vertical para um mesmo tipo de solo e um mesmo volume de água aplicado. Amir e Dag (1993) estudaram a aplicação de água por gotejadores em 9 diferentes vazões e relatam que o aumento da vazão proporcionou a formação de um bulbo molhado mais largo e menos profundo, inclusive com a formação de uma poça saturada na superfície do solo que poderia causar escoamento superficial. Tabhet e Zayani (2008) utilizaram as vazões de 1,5 e 4 L h<sup>-1</sup> e concluíram que a menor vazão permitiu a formação de um bulbo molhado mais profundo e menos largo para os tempos iniciais da aplicação de água.

Para o solo argiloso material, na vazão de 2 L h<sup>-1</sup>, a profundidade do bulbo molhado no tempo de aplicação igual a 160 min foi de 50 cm e a largura nesse mesmo tempo foi de 22 cm. Na vazão de 4 L h<sup>-1</sup> a maior profundidade foi de 40 cm e a maior largura de 20 cm no tempo de 80 min. Para a vazão de 6 L h<sup>-1</sup> estas mesmas dimensões foram obtidas no tempo de 50 min. COTE et al. (2003) observaram que a forma do bulbo molhado foi mais alongado em solos arenosos e com formato esférico em solos de textura fina. Nos solos argilosos, em razão da menor taxa de infiltração, verifica-se a formação de um bulbo molhado com maior dimensão horizontal devido a maior influência das forças de retenção sobre a força da gravidade (BRESLER, 1978).

## 5 CONCLUSÕES

O modelo numérico proposto foi capaz de simular o bulbo molhado nas mais diferentes condições de textura e estrutura do solo e de conteúdo de água inicial.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.R.; BROCKWAY, C.E. Concepts for energy-efficient irrigation system design. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 110, n. 2, p. 99-106, 1984.
- AMIR, I.; DAG, J. Lateral and longitudinal wetting patterns of very low energy moving emitters. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 13, n. 4, p. 183-187, 1993.
- BASTIAANSEN, W.G.M.; ALLEN, R.G.; DROOGERS, P.; D'URSO, G.D.; STEDUTO, P. Twenty-five years modeling irrigated and drained soils: state of the art. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 92, p. 111-125, 2007.
- BRESLER, E. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 1, n. 1, p. 3-17, 1978.
- BRESLER, E. Trickle-drip irrigation: principles and application to soil water management. **Advances in Agronomy**, New York, v. 29, p. 343-393, 1977.



COTE, C.M.; BRISTOW, K.L.; CHARLESWORTH, P.B.; COOK, F.J.; THORBURN, P.J. Analysis of soil wetting and solute transport in sub-surface trickle irrigation. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 22, n. 3, p. 143-156, 2003.

EL-HAFEDH, A.V.O.M.; DAGHARU, H.; MAALEJ, M. Analysis of several discharge rate spacing duration combinations in drip irrigation system. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 52, p. 33-52, 2001.

GHALI, G.S.; SVEHLIK, Z.J. Soil-water dynamics and optimum operating regime in trickle-irrigated fields. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 13, p. 127-143, 1988.

HATFIELD, J.L.; SAUER, T.J.; PRUEGER, J.H. Managing soils to achieve greater water use efficiency. A review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 271–280, 2001

HOWELL, T. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture, **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 281–289, 2001.

MMOLAWA, K.; OR, D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: a review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 222, p. 163-190, 2000.

SIMUNEK, J. Models of water flow and solute transport in the unsaturated zone. In: ANDERSON, M.G. **Encyclopedia of hydrological sciences**. West Sussex: John Wiley, 2005. p. 1171-1180.

THABET, M.; ZAYANI, K. Wetting patterns under trickle source in a loamy sand soil of south Tunisia. **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Science**, Alexandria, v. 3, n. 1, p. 38-42, 2008.

