

## ESTIMATIVA DE DIMENSÕES DE VOLUME DE SOLO MOLHADO NA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SUPERFICIAL EM SOLO DE TEXTURA MÉDIA: CONDIÇÃO INICIAL DE SOLO SECO

Sérgio Luiz Aguilar Levien<sup>1</sup>; Jarbas Honório de Miranda<sup>2</sup>; Andre Herman Freire Bezerra<sup>3</sup>

### RESUMO

O uso de modelos para descrever ou estimar a distribuição de água no volume de solo molhado pode ser uma importante alternativa na definição de dimensionamento e manejo da irrigação. Desenvolveu-se este trabalho com o objetivo de estimar dados de dimensão de volume de solo molhado gerados em diferentes solos sob irrigação por gotejamento superficial utilizando modelos matemáticos existentes na literatura. Foram selecionados dados de uma classe de solo (solo franco), simulando três vazões de emissor (0,503; 1,48 e 2,70 L h<sup>-1</sup>), e 12 tempos de aplicação de água no solo (de 1 a 12 h), sob a condição de umidade inicial do solo seco. Estimou-se os valores do padrão de molhamento (largura máxima e profundidade máxima) pelos cinco modelos estudados (um numérico, um analítico e três empíricos). Os valores de largura máxima simulados variaram de 18,67 a 108,89 cm e os valores de profundidade máxima simulados variaram de 5,98 a 61,75 cm. Os modelos numérico (PSIGS) e analítico (WetUp) apresentam resultados mais confiáveis. O modelo empírico DIPAC, apresenta resultados com valores e comportamento similares aos dos modelos mais robustos.

**Palavras-chave:** movimento de água no solo, manejo de irrigação, modelo matemático, bulbo molhado, microirrigação

## ESTIMATING OF WETTED SOIL VOLUME DIMENSIONS IN THE SURFACE DRIP IRRIGATION ON TEXTURED MEDIUM SOIL: DRY INITIAL SOIL CONDITION

### ABSTRACT

The use of models to describe or estimate the water distribution in the wetted soil volume can be an important alternative in the definition of the irrigation management and design. The objective of this work was to estimate dimension data of soil wetted volume generated in different soil types under surface drip irrigation using mathematical models of

<sup>1</sup> Engenheiro Agrícola, D.Sc., Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, UFERSA, Mossoró, RN, e-mail: sergiolevien@ufersa.edu.br

<sup>2</sup> Engenheiro Agrônomo, D.Sc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, ESALQ/USP, Piracicaba, SP, e-mail: jhmirand@usp.br

<sup>3</sup> Engenheiro Agrônomo, M.Sc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, ESALQ/USP, Piracicaba, SP, e-mail: andre.berman@yahoo.com

## ESTIMATIVA DE DIMENSÕES DE VOLUME DE SOLO MOLHADO NA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SUPERFICIAL EM SOLO DE TEXTURA MÉDIA: CONDIÇÃO INICIAL DE SOLO SECO

the literature. There were selected data from one class of soil (loam soil), simulating three emitter flow rates (0.503, 1.48 and 2.70 L h<sup>-1</sup>) and 12 soil water application times (1 to 12 h) with a dry initial soil condition. The values of the wetting pattern were estimated (maximum width and maximum depth) by the five studied models (one numerical, one analytical and three empirical). The simulated maximum width ranged from 18.67 to 108.89 cm and maximum depth ranged from 5.98 to 61.75 cm. The numerical (PSIGS) and analytical (WetUp) models present more reliable results. The empirical model DIPAC presents results with values and behavior similar to those of more robust models

**Keywords:** soil water movement, irrigation management, mathematical model, wetted bulb, microirrigation

### INTRODUÇÃO

A irrigação tem demonstrado ser uma das alternativas para o desenvolvimento socioeconômico de diversas regiões do mundo. No entanto, ela deve ser manejada racionalmente, a fim de evitar problemas de salinização dos solos e de degradação dos recursos hídricos e edáficos, uma vez que as condições climáticas dessas regiões, muitas vezes, são extremamente favoráveis à ocorrência desses problemas.

Nos últimos anos, verificou-se avanços em equipamentos, dimensionamento e manejo da irrigação localizada. Isto ocorreu devido, principalmente, ao melhor entendimento do movimento de água no solo quando se utiliza o ponto de emissão de água superficial. Uma das condições para o melhor dimensionamento da irrigação localizada com ponto de emissão superficial é o conhecimento da distribuição da umidade no solo para diferentes vazões dos emissores e tempo de irrigação, e este, juntamente com o tipo de solo, influenciam no movimento da água (Lubana & Narda, 1998; Lubana & Narda, 2001).

Informações confiáveis sobre as dimensões do volume de solo molhado sob irrigação por gotejamento ajudam os projetistas (designers) a determinar as vazões do emissor e os espaçamentos ideais para reduzir os custos dos equipamentos do sistema e oferecer as melhores condições de umidade do solo para o uso mais eficiente e eficaz da água

(Kandelous & Simunek, 2010a; Malek & Peters, 2011).

Pesquisadores têm utilizado diversos métodos para prever as dimensões do volume de solo molhado sob irrigação por gotejamento. Estes métodos podem ser classificados em três grandes grupos: numérico, analítico e empírico (Kandelous & Simunek, 2010b; Malek & Peters, 2011).

Há uma série de modelos que descrevem a infiltração de uma fonte pontual ou de uma faixa molhada que pode ser usada para projetar, instalar e gerenciar sistemas de irrigação por gotejamento. Alguns destes modelos analíticos, numéricos e empíricos têm sido desenvolvidos para estimar as dimensões do volume de solo molhado na irrigação por gotejamento superficial e subterrâneo de uma fonte pontual. Enquanto os modelos empíricos têm sido tipicamente desenvolvidos utilizando uma análise de regressão de observações de campo, modelos analíticos e numéricos, normalmente, resolvem equações que regem o fluxo sob determinadas condições iniciais e de contorno (Kandelous & Simunek, 2010a).

O conhecimento da distribuição de água no volume molhado sob gotejamento é essencial na determinação de quanto irrigar 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

ESTIMATIVA DE DIMENSÕES DE VOLUME DE SOLO MOLHADO NA IRRIGAÇÃO  
POR GOTEJAMENTO SUPERFICIAL EM SOLO DE TEXTURA MÉDIA: CONDIÇÃO  
INICIAL DE SOLO SECO

para diferentes opções de manejo (Coelho et al., 1999). Atualmente são encontrados na literatura vários modelos que simulam a distribuição de água no volume de solo molhado dentre os quais podemos citar como mais utilizado o modelo HYDRUS (Simunek et al., 1999; Simunek et al., 2006; Simunek et al., 2011), e também alguns outros como WetUp (Cook et al.,

2003), DIPAC (Amin & Ekhmaj, 2006) e PSIGS (Souza, 2009).

O presente trabalho teve como objetivo estimar dados de dimensão de volume de solo molhado gerados, por diferentes modelos, em solos de textura média sob irrigação por gotejamento superficial, sob a condição inicial de solo seco.

### MATERIAL E MÉTODOS

Há uma série de modelos que descrevem a infiltração de uma fonte pontual ou de uma faixa molhada que pode ser usada para projetar, instalar e gerenciar sistemas de irrigação por gotejamento. Dentre estes modelos existentes na literatura selecionou-se cinco modelos sendo um numérico (modelo PSIGS), um analítico (modelo WetUp) e três empíricos (modelo DIPAC; modelo de Schwartzman & Zur, 1986; e modelo de Levien et al., 2011).

Souza (2009) desenvolveu um modelo numérico para a simulação do movimento de água no solo sob irrigação por gotejamento superficial, utilizando o método dos volumes finitos para a resolução da equação diferencial parcial de escoamento de água em meios porosos, considerando o solo um meio poroso estável, homogêneo e isotrópico. As propriedades hidráulicas do solo foram modeladas usando as relações de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980).

A equação de Richards, considerando o solo um meio poroso, estável e isotrópico, tem a seguinte forma:

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

Dada a discretização do domínio em volumes de controle, a equação (1) se torna:

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = K_{MED_x}(\theta) \frac{\Delta(\Delta H_x)}{(\Delta x)^2} +$$

$$K_{MED_y}(\theta) \frac{\Delta(\Delta H_y)}{(\Delta y)^2} + K_{MED_z}(\theta) \frac{\Delta(\Delta H_z)}{(\Delta z)^2} \quad (2)$$

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.

O fluxo de água no solo foi tratado tridimensionalmente para a determinação do seu movimento nas fases de infiltração e redistribuição. O modelo, entre outras possibilidades, permite a determinação da forma e das dimensões do bulbo molhado, possibilitando a utilização dessas informações para a elaboração de projetos e manejo da irrigação.

Baseado na formulação matemática proposta, Souza (2009) elaborou um programa computacional denominado PSIGS (Programa para Simulação da Irrigação por Gotejamento Superficial), sendo o mesmo um aplicativo do Microsoft Windows escrito em Visual Basic que resolve a equação de Richards usando a abordagem proposta pelo referido autor.

O fluxo de água a partir de um emissor (gotejador) pode ser descrito pela forma bidimensional (2D) da equação de Richards. Esta equação tem sido resolvida tanto numericamente como analiticamente por vários pesquisadores. Para resolver esta equação condições de contorno e iniciais deve ser selecionadas. Philip (1984) desenvolveu uma solução analítica na qual ele linearizava a equação de Richards usando a função da condutividade hidráulica proposta por Gardner.

As soluções propostas por Philip (1984) foram usadas para calcular os padrões de molhamento no software

ESTIMATIVA DE DIMENSÕES DE VOLUME DE SOLO MOLHADO NA IRRIGAÇÃO  
POR GOTEJAMENTO SUPERFICIAL EM SOLO DE TEXTURA MÉDIA: CONDIÇÃO  
INICIAL DE SOLO SECO

WetUp (Cook et al., 2003). Para este fim, algumas hipóteses simplificadas de Thorburn et al. (2003) foram seguidas.

WetUp é um aplicativo do Microsoft Windows escrito em Visual Basic que resolve a equação de Richards usando a abordagem analítica de Philip (1984). Este software fornece uma maneira fácil de estimar o padrão de molhamento sob irrigação por gotejamento. WetUp contém um banco de dados de valores pré-calculados tais como tipo de solo, potencial de água inicial do solo, tempo de irrigação e vazão do emissor e pode-se somente interpolar dentro desse banco de dados, uma vez que os parâmetros de entrada são especificados pelo usuário. Isso permite a fácil adição ou modificação de dados.

O banco de dados do WetUp contém informações de solos australianos, para vazões de emissor variando de 0,503 a 2,70 L h<sup>-1</sup>, e para três diferentes potenciais matriciais iniciais do solo de -10, -6, e -3 m, ou seja, de solos seco (“dry”), úmido (“moist”) e molhado (“wet”).

Como o padrão de molhamento calculado pelo WetUp sempre é elíptico, os diâmetros da elipse estimada foram selecionados para representar as dimensões da zona de molhamento.

Vários modelos empíricos foram baseados em vários pressupostos e condições de gotejamento diferentes (Schwartzman e Zur, 1986; Amin e Ekhmaj, 2006; Malek e Peters, 2011; Levien et al., 2011).

Schwartzman e Zur (1986) desenvolveram um modelo semi-empírico usando análise adimensional para prever as dimensões da zona molhada em irrigação por gotejamento. O modelo empírico foi desenvolvido usando os resultados experimentais de dois solos (solos franco e arenoso) e de duas vazões de emissor apresentados por Bresler (1978). Eles assumem que as dimensões molhadas se relacionam com a vazão do emissor, o volume total de água aplicado, e a condutividade hidráulica do solo saturado.

Schwartzman e Zur (1986) apresentam as seguintes relações:

$$z = 2.54 \cdot V^{0.63} \cdot \left(\frac{K_s}{q}\right)^{0.45} \quad (3)$$

e

$$d = 1.82 \cdot V^{0.22} \cdot \left(\frac{K_s}{q}\right)^{-0.17} \quad (4)$$

ou

$$d = 1.32 \cdot z^{0.35} \cdot q^{0.33} \cdot K_s^{-0.33} \quad (5)$$

onde z é a profundidade do volume de solo molhado (em m); d é o diâmetro do volume de solo molhado (em m); V é o volume total de água aplicada na irrigação por gotejamento (em m<sup>3</sup>); K<sub>s</sub> é a condutividade hidráulica do solo saturado (em m s<sup>-1</sup>); e q é a taxa de descarga (vazão) do emissor (em m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>).

Amin e Ekhmaj (2006) apresentam o modelo DIPAC (Drip Irrigation Water Distribution Pattern Calculator) em que desenvolveram duas relações empíricas que calculam a largura e a profundidade da zona umedecida. Eles desenvolveram seus modelos empíricos por análise de regressão. Em suas relações, assumiu-se que o raio e a profundidade da zona úmida têm relações com o volume total de água aplicada, a vazão do emissor, a condutividade hidráulica do solo saturado e o conteúdo médio de água do solo durante a irrigação. Os coeficientes de suas relações foram obtidos de dados publicados de quatro experimentos realizados em quatro diferentes solos e condições de irrigação (Taghavi et al., 1984; Angelakis et al., 1993; Moncef et al., 2002; Li et al., 2003). Amin e Ekhmaj (2006) apresentam as seguintes relações:

$$z = \Delta\theta^{-0.383} \cdot V^{0.365} \cdot q^{-0.101} \cdot K_s^{0.195} \quad (6)$$

e

$$r = \Delta\theta^{-0.5626} \cdot V^{0.2686} \cdot q^{-0.0028} \cdot K_s^{-0.0344} \quad (7)$$

onde z é a profundidade do volume de solo

ESTIMATIVA DE DIMENSÕES DE VOLUME DE SOLO MOLHADO NA IRRIGAÇÃO  
POR GOTEJAMENTO SUPERFICIAL EM SOLO DE TEXTURA MÉDIA: CONDIÇÃO  
INICIAL DE SOLO SECO

molhado (em cm);  $r$  é o raio superficial do volume de solo molhado (em cm);  $\Delta\theta$  é o conteúdo médio de água do solo durante a irrigação ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  $V$  é o volume total de água aplicada (mL);  $q$  é a vazão do emissor ( $\text{mL h}^{-1}$ ); e  $K_s$  é a condutividade hidráulica do solo saturado ( $\text{cm h}^{-1}$ ).

Levien et al. (2011) desenvolveram modelos empíricos para três tipos de solos (solo de textura argilosa, franca e arenosa). Eles assumem, em seu modelo, que as dimensões máximas (horizontal e vertical) de um bulbo isolado na irrigação por gotejamento superficial se relacionam com o volume total de água aplicada durante o evento da irrigação. Seus modelos foram desenvolvidos usando regressão linear, utilizando como fonte os dados experimentais de Medeiros et al. (2004), que realizaram experimentos com seis diferentes classes de solos da região de fruticultura irrigada do Rio Grande do Norte, no Nordeste Brasileiro. Levien et al. (2011) propõem as seguintes relações, para solo de textura franca:

$$W = 0.2367 \cdot V^{0.3505} \quad (8)$$

e

$$Z = 0.1620 \cdot V^{0.3859} \quad (9)$$

onde  $W$  é o diâmetro máximo do volume de solo molhado (em m);  $Z$  é a profundidade máxima do volume de solo molhado (em m); e  $V$  é o volume total aplicado durante a irrigação (em L).

Selecionou-se uma das doze classes de solos do USDA (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos), sendo que os valores médios da classe foram obtidos utilizando os softwares SPAW (Saxton et al., 1986; Saxton & Rawls, 2006) e ROSETTA (Schaap & Leij, 1998; Schaap et al., 2001). A classe de solo selecionada foi: solo franco ("loam soil").

Os valores dos dados médios da classe de solo selecionada, obtidos pelo software SPAW, estão resumidos na Tabela 1.

**Tabela 1.** Dados médios da classe de solo selecionada, do estudo de dinâmica de água no solo irrigado por gotejamento superficial

Classe de solo	Argila	Silte	Areia	Ds
		$\text{g kg}^{-1}$		$\text{g cm}^{-3}$
franco ("loam")	180	400	420	1,57

Os valores dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980), obtidos pelo software ROSETTA, para dados

médios da classe de solo selecionada, estão resumidos na Tabela 2.

**Tabela 2.** Parâmetros da equação de retenção de água no solo, usando o modelo de van Genuchten, do estudo de dinâmica de água no solo irrigado por gotejamento superficial

Classe de solo	Parâmetros				
	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	n	$K_s$
	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$		$\text{cm}^{-1}$	-	$\text{cm h}^{-1}$
franco ("loam")	0,06090	0,39910	0,01112	1,47367	0,50152

As vazões de emissor selecionadas foram 0,503; 1,48 e 2,70  $\text{L h}^{-1}$ ; o valor do teor de água inicial foi o correspondente, para o solo selecionado, ao potencial matricial inicial do solo de -10 m, ou seja,

de solo seco; e os tempos de aplicação de água no solo foram de 1 a 12 h, com intervalo de 1 h, entre eles.

Com estes dados selecionados estimou-se os valores do padrão de

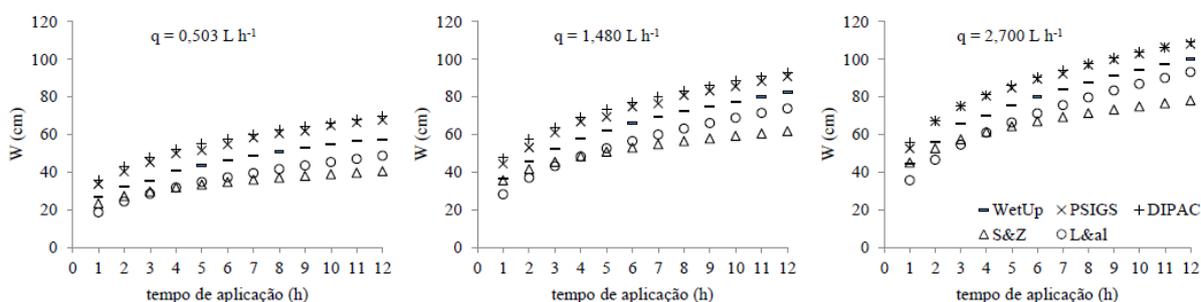
## ESTIMATIVA DE DIMENSÕES DE VOLUME DE SOLO MOLHADO NA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SUPERFICIAL EM SOLO DE TEXTURA MÉDIA: CONDIÇÃO INICIAL DE SOLO SECO

molhamento (largura máxima e profundidade máxima) pelos diferentes modelos estudados.

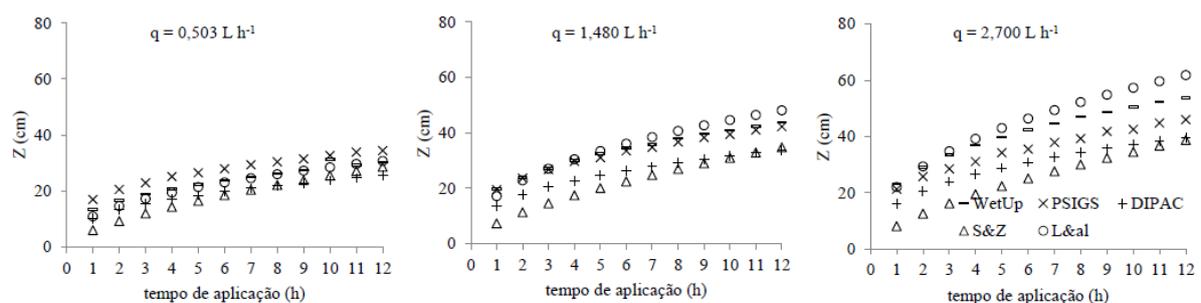
### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o estudo proposto neste trabalho analisou-se o comportamento dos cinco modelos propostos na literatura: PSIGS (Souza, 2009), WetUp (Cook et al., 2003), DIPAC (Amin e Ekhnaj, 2006), Schwartzman & Zur (1986) e Levien et al.

(2011); sendo que os mesmos foram testados para condições de umidade inicial de solo seco. Nas Figuras 1 e 2 são apresentados os dados estimados de largura máxima (W) e profundidade máxima (Z) obtidos através das simulações realizadas, respectivamente.



**Figura 1.** Dados de largura máxima (W) estimados pelos modelos WetUp, PSIGS, DIPAC, Schwartzman & Zur e Levien et al., utilizando três diferentes vazões (0,503; 1,48 e 2,70 L h<sup>-1</sup>), em condições iniciais de solo seco (h = -1000 cm): solo franco (“loam”)



**Figura 2.** Dados de profundidade máxima (Z) estimados pelos modelos WetUp, PSIGS, DIPAC, Schwartzman & Zur e Levien et al., utilizando três diferentes vazões (0,503; 1,48 e 2,70 L h<sup>-1</sup>), em condições iniciais de solo seco (h = -1000 cm): solo franco (“loam”)

Os resultados obtidos através das simulações pelos diferentes modelos apresentam diferenças entre os modelos estudados, tanto para largura máxima (Figura 1) como para profundidade máxima (Figura 2).

Os valores de largura máxima (W) simulados pelo modelo PSIGS variam de

33,66 a 108,08 cm, pelo modelo WetUp de 26,93 a 100,18 cm, pelo modelo DIPAC de 35,74 a 108,89 cm, pelo modelo de Schwartzman & Zur (1986) de 23,47 a 78,08 cm e, pelo modelo de Levien et al. (2011) de 18,67 a 93,16 cm.

Os valores de profundidade máxima (Z) simulados pelo modelo PSIGS variam

## ESTIMATIVA DE DIMENSÕES DE VOLUME DE SOLO MOLHADO NA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SUPERFICIAL EM SOLO DE TEXTURA MÉDIA: CONDIÇÃO INICIAL DE SOLO SECO

de 16,91 a 45,96 cm, pelo modelo WetUp de 13,48 a 53,67 cm, pelo modelo DIPAC de 10,26 a 39,62 cm, pelo modelo de Schwartzman & Zur (1986) de 5,98 a 38,70 e, pelo modelo de Levien et al. (2011) de 10,93 a 61,75 cm.

Observando-se as Figuras 1 e 2, pode-se notar que o comportamento dos modelos testados são semelhantes (na maioria dos casos estudados as curvas são paralelas), com exceção dos modelos empíricos de Schwartzman & Zur (1986) e de Levien et al. (2011). Os modelos numérico e analítico apresentam resultados muito próximos, sendo que os modelos apresentam hipóteses simplificadoras diferentes. Já quanto aos modelos empíricos, que são bem mais simples que os outros, apresentam resultados diferentes mesmo entre eles. O modelo DIPAC apresenta um bom desempenho (resultados mais próximos dos obtidos pelos modelos mais complexos) que pode ser explicado devido ao mesmo considerar o conteúdo médio de água do solo durante a irrigação e a diferença entre este valor e a umidade fora da zona considerada (bulbo) na sua estrutura. Já os outros modelos empíricos não levam em consideração este detalhe. Pode-se assim constatar que a consideração de um parâmetro relacionado com o conteúdo de água no solo é um requisito

### CONCLUSÕES

Os dados simulados de dimensões do volume molhado do solo de textura média, para diferentes vazões de emissores, em diferentes tempos de aplicação, podem ser usados para orientar a irrigação localizada em solos semelhantes, observando que os modelos numérico (PSIGS) e analítico (WetUp) apresentam resultados mais confiáveis. O modelo empírico DIPAC,

### REFERÊNCIAS

AMIN, M.S.M.; EKHMAJ, A.I.M. DIPAC-drip irrigation water distribution pattern calculator. 7th **International Micro Irrigation Congress**, PWTC,

importante para um modelo empírico para estimar padrões de molhamento na irrigação por gotejamento.

Embora os valores estimados usando os diferentes modelos não sejam iguais, na literatura encontramos justificativas para o uso dos mesmos. Segundo Lubana & Narda (2001), pesquisadores adotam modelos matemáticos para descrever a infiltração de uma fonte pontual ou em linha que podem ser usados para projetar, instalar e manejar sistemas de irrigação por gotejamento. Os modelos matemáticos têm várias vantagens sobre outras técnicas de estimativa, entre elas: modelos são relativamente fáceis de usar; os modelos simulam o componente infiltração incorporando conceitos amplamente aceitos da física do solo (exceto para os modelos empíricos); parâmetros de entrada requeridos podem ser facilmente obtidos a partir da literatura publicada, bem como bases de dados eletrônicas; medição *in situ*, embora recomendada, não é necessária para obter estimativas preliminares de fluxo de água; variabilidade espacial de parâmetros do solo pode ser contabilizada nos modelos ou determinística ou estatisticamente; e, auxilia muito no projeto e na análise de experimentos de campo e na determinação de processos e propriedades mais importantes que afetam o desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento.

apresenta resultados com valores e comportamento similares aos dos modelos mais robustos.

### AGRADECIMENTOS

À CAPES pela concessão da bolsa de Estágio de Pós-Doutorado ao primeiro autor, o que possibilitou a realização deste trabalho

Kuala Lumpur, Malaysia, p.503-513, 2006.

ANGELAKIS, A.N.; KADIR, T.N.; ROLSTON, D.E. Time-dependent soil-water distribution under a circular trickle source. *Water Resources Management*, v.7,

ESTIMATIVA DE DIMENSÕES DE VOLUME DE SOLO MOLHADO NA IRRIGAÇÃO  
POR GOTEJAMENTO SUPERFICIAL EM SOLO DE TEXTURA MÉDIA: CONDIÇÃO  
INICIAL DE SOLO SECO

n.3, p.225-235, 1993.

BRESLER, E. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. **Irrigation Science**, v.1, n.1, p.3-17, 1978.

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.

COOK, F.J.; THORBURN, P.J.; FITCH, P.; BRISTOW, K.L. WetUp: a software tool to display approximate wetting patterns from drippers. **Irrigation Science**, v.22, p.129-134, 2003.

KANDELOUS, M.M.; SIMUNEK, J. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. **Irrigation Science**, v.28, p.435-444, 2010a.

KANDELOUS, M.M.; SIMUNEK, J. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. **Agricultural Water Management**, v.97, p.1070-1076, 2010b.

LEVIEN, S.L.A.; MAIA, C.E.; MEDEIROS, J.F. Dimensions of wetted soil volume on the surface drip irrigation in Semiarid of Brazil. In: BILIBIO, C.; HENSEL, O.; SELBACH, J. Sustainable water management in the tropics and subtropics - and case studies in Brazil. Fundação Universidade Federal do Pampa, **UNIKASSEL, PG-Cult-UFMA**, v.1, p.983-1003, 2011.

LI, J.; ZHANG, J.; REN, L. Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source. **Irrigation Science**, v.22, n.1, p.19-30, 2003.

LUBANA, P.P.S.; NARDA, N.K. Soil water dynamics model for trickle irrigated tomatoes. **Agricultural Water Management**, v.37, p.145-161, 1998.

LUBANA, P.P.S.; NARDA, N.K. Modelling soil water dynamics under trickle emitters – a review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.78, n.3, p.217-232, 2001.

MALEK, K.; PETERS, R.T. Wetting pattern models for drip irrigation: new empirical model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.137, n.8, p.530-536, 2011.

MEDEIROS, J.F.; LEVIEN, S.L.A.; MAIA, C.E. **Caracterização de bulbo úmido em solos utilizados na irrigação localizada na região de fruticultura irrigada no Agropolo Assu-Mossoró**. 2004. Escola Superior de Agricultura de Mossoró. Relatório Técnico, CNPq. 89 p.

MONCEF, H.; HEDI, D.; JELLOUL, B.; MOHAMED, M. Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: theory and numerical aspect. **Irrigation and Drainage**, v.51, n.4, p.347-360, 2002.

PHILIP, J.R. Travel times from buried and surface infiltration points sources. **Water Resources Research**, v.20, p.990-994, 1984.

SAXTON, K.E.; RAWLS, W.J.; ROMBERGER, J.S.; PAPENDICK, R.I. Estimating generalized soil water characteristics from texture. **Soil Science Society of American Journal**, v.50, p.1031-1035, 1986.

SAXTON, K.E.; RAWLS, W.J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. **Soil Science Society of American Journal**, v.70, p.1569-1578, 2006.

ESTIMATIVA DE DIMENSÕES DE VOLUME DE SOLO MOLHADO NA IRRIGAÇÃO  
POR GOTEJAMENTO SUPERFICIAL EM SOLO DE TEXTURA MÉDIA: CONDIÇÃO  
INICIAL DE SOLO SECO

SCHAAP, M.G.; LEIJ, F.J. Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. **Soil Science**, v.163, p.765-779, 1998.

SCHAAP, M.G.; LEIJ, F.J.; van GENUCHTEN, M.T. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. **Journal of Hydrology**, v.251, p.163-176, 2001.

SCHWARTZMAN, M.; ZUR, B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.112, n.3, p.242-253, 1986.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; van GENUCHTEN, M.T. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. Version 2.0. USDA, ARS, **USSL**, Riverside, USA. 1999. 227p.

SIMUNEK, J.; van GENUCHTEN, M.T.; SEJNA, M. **The Hydrus software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media**. Technical Manual, version 1.0. PC Progress, Prague, Czech Republic. 2006. 213p.

SIMUNEK, J.; van GENUCHTEN, M.T.; SEJNA, M. **The HYDRUS software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media**. Technical Manual, version 2.0. PC Progress, Prague, Czech Republic. 2011. 258p.

SOUZA, L.A.A. **Fluxo tridimensional de água no solo: aplicação de volumes finitos na simulação da irrigação por gotejamento superficial**. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró. 128p, 2009.

TAGHAVI, S.A.; MARIÑO, M.A.; ROLSTON, D.E. Infiltration from trickle irrigation source. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.110, n.4, p.331-341, 1984.

THORBURN, P.J.; FREEMAN, J.C.; BRISTOW, K.L. Soil-dependent wetting from trickle emitters: implications for system design and management. **Irrigation Science**, v.22, p.121-127, 2003.

van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, n.5, p.892-898, 1980.