

SIMULAÇÃO DE FAIXA MOLHADA NA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SUPERFICIAL USANDO HYDRUS 2D

S. L. A. Levien¹; L. E. V. de Arruda¹

RESUMO: O modelo Hydrus 2D é um conhecido pacote de softwares baseado no Windows que é usado para simular o movimento de água, calor e/ou soluto em meios porosos bidimensionais, variavelmente saturados. Objetivou-se com este trabalho, utilizando-se o modelo Hydrus 2D, simular a formação de bulbos molhados sobrepostos e, por consequência, de uma faixa molhada ao longo da linha lateral, permitindo a determinação da forma e das dimensões da mesma. Foram utilizados dados de um solo de textura franca, com cinco vazões de emissor, quatro tempos de aplicação de água no solo, e quatro separações entre emissores, considerando-se o valor do teor de água inicial correspondendo ao potencial matricial na capacidade de campo. Com estes dados selecionados estimou-se os valores do padrão de molhamento, tanto para bulbo molhado isolado como na formação de faixa molhada, através de simulação usando o modelo Hydrus 2D. Os resultados obtidos pela simulação do solo franco com diferentes separações entre emissores mostram-se adequados à realidade e condizentes com a teoria, podendo ser aplicados no dimensionamento de instalações de irrigação por gotejamento superficial.

PALAVRAS-CHAVE: Movimento de água no solo, volume de solo molhado, modelagem numérica.

SIMULATION OF WETTED STRIP IN SURFACE DRIP IRRIGATION USING HYDRUS 2D

ABSTRACT: The Hydrus 2D model is a well-known Windows-based software package that is used to simulate the movement of water, heat and/or solute in two-dimensional, variably saturated porous media. The objective of this paper, using the Hydrus 2D model, was to simulate the formation of wetted bulbs overlapped and, consequently, of a wetted strip along the lateral line, allowing the determination of the shape and dimensions of the same. We used data from a loam-textured soil, with five emitter flow rates, four soil water application times,

¹ Centro de Engenharias, UFRSA, Mossoró-RN, e-mail: sergiolevien@ufersa.edu.br; luizengeaa@hotmail.com

and four emitters spacing, considering the initial water content value corresponding to the matric potential at the field capacity. With these selected data, the values of the soil wetting pattern were estimated for both isolated wetted bulb and wetted strip, through simulation using the Hydrus 2D model. The results obtained by the simulation of the loam soil with different emitters spacing are suited to the reality and in agreement with the theory, could be applied in the design of surface drip irrigation installations.

KEYWORDS: Soil water movement, wetted soil volume, numerical modeling.

INTRODUÇÃO

O fluxo de água e sua distribuição dentro do solo através de irrigação por gotejamento são diferentes daqueles obtidos com outros métodos de irrigação. Na irrigação por gotejamento superficial os emissores são posicionados ao longo das linhas laterais do sistema de irrigação, garantindo, muitas vezes, a sobreposição dos volumes de solo molhado pelos gotejadores adjacentes, criando uma faixa molhada, que é a escolha preferida para a irrigação de culturas anuais densamente cultivadas (Rodrigo López et al, 1992; Pereira, 2004; Sne, 2005; Evans et al., 2007; Souza, 2009; Levien, 2014).

As atuais práticas de projeto de irrigação por gotejamento tendem a enfatizar o desempenho hidráulico do sistema, enquanto as considerações agronômicas, como interações emissor-solo-planta, recebem menos atenção ou são tratadas de forma empírica. Essa disparidade pode ser atribuída, em grande parte, à complexidade dos processos agronômicos que normalmente não são passíveis de regras simples de design (Rodrigo López et al, 1992; Dasberg & Or, 1999).

A variabilidade na água disponível à planta é determinada não apenas pela uniformidade da aplicação do emissor, mas também pelas considerações de variações disponíveis da água do solo devido a propriedades variáveis do solo e à interação entre a extensão da região da raiz da planta e o espaçamento entre emissores (Dasberg & Or, 1999).

A simulação permite acompanhar a evolução da formação dos bulbos molhados, ao longo do tempo, mediante a fixação do espaçamento entre emissores e da vazão do gotejador, podendo-se ao final obter os resultados que melhor se adequem às características do solo (Lubana & Narda, 2001; Subbaiah, 2013).

Na literatura há alguns modelos que descrevem a infiltração de uma fonte pontual que pode ser usada para projetar, instalar e gerenciar sistemas de irrigação por gotejamento, mas

muito poucos que descrevem a formação de uma faixa molhada. Entre estes modelos que possibilitam simular a formação de uma faixa molhada podemos citar os modelos HYDRUS 2D/3D (Simunek et al., 1999; 2006; 2016a) e PSIGS (Souza, 2009). O modelo numérico Hydrus (Simunek et al., 1999; 2006; 2016a), um conhecido pacote de softwares que pode ser usado no ambiente Windows, é usado para simular o movimento de água, calor e/ou soluto em uma dimensão, ou duas e três dimensões em meios porosos variavelmente saturados.

Poucos trabalhos que são apresentados na literatura realizaram estudos dos padrões de molhamento na formação de bulbos molhados isolados e/ou faixa molhada sob irrigação por gotejamento superficial. Podemos citar os trabalhos de Levien & Miranda (2006), Souza (2009) e Levien (2014), além do modelo empírico proposto por Dasberg & Or (1999) no qual os autores se basearam nos modelos de Schwartzman & Zur (1986) e Zur (1996).

Objetivou-se com este trabalho realizar simulações numéricas, utilizando o modelo computacional Hydrus 2D, da dinâmica da água no solo na formação de bulbos molhados sobrepostos e, por consequência, de uma faixa molhada ao longo da linha lateral, permitindo a determinação da forma e das dimensões da mesma.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho utilizou-se o modelo Hydrus 2D para simular a formação de bulbos molhados sobrepostos e, por consequência, de uma faixa molhada ao longo da linha lateral de um sistema de irrigação por gotejamento superficial, permitindo a determinação da forma e das dimensões da mesma.

Para as simulações selecionou-se um solo de textura média, utilizando-se cinco vazões de emissores e quatro tempos de aplicação de água no solo; e, para testar a formação de faixa molhada, estipularam-se quatro diferentes separações entre emissores.

A classe de solo selecionada foi solo franco (loam soil). Os valores médios das frações granulométricas e densidade do solo da classe foram obtidos utilizando o software SPAW (Saxton & Rawls, 2006), e são apresentados na Tabela 1.

A infiltração de água, com consequente formação do volume de solo molhado (bulbo), e posterior formação de uma faixa molhada no solo foram simuladas usando o modelo Hydrus 2D (Simunek et al., 2016a). Assumindo que o solo é um meio poroso estável, homogêneo e isotrópico, a equação governante para o movimento da água é a equação bidimensional (2D) de Richards. O método de elementos finitos de Galerkin é usado pelo modelo Hydrus 2D para resolver a equação de Richards (Simunek et al., 2016b).

Os perfis simulados consistem em um ponto de emissão (emissor) colocado no canto superior esquerdo, como mostrado na Figura 1. A dimensão horizontal do domínio do fluxo foi considerada 0,50 m, para o caso de formação de bulbo isolado, ou a metade do valor da separação entre emissores, para o caso de formação de faixa molhada. A dimensão vertical foi igual a 0,50 m, a qual incluiu a profundidade do solo a ser estudada. Assumiu-se que o fluxo de água lateral ao longo dos limites era zero (condição de limite No Flux), no limite superior próximo da posição do emissor assumiu-se a condição de fluxo variável (Variable Flux 1), no restante do limite superior usou-se a condição de limite de fluxo zero, e no limite inferior definiu-se como condição de limite de drenagem livre (Free Drainage).

O modelo Hydrus necessita dos parâmetros hidráulicos do solo, isto é, θ_s , θ_r , α , n e K_s , bem como o teor inicial de água do solo. Os valores dos parâmetros da equação de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980), foram obtidos utilizando o software Rosetta (Schaap et al., 2001) que está acoplado ao modelo Hydrus 2D, e estão apresentados na Tabela 2.

As vazões de emissor selecionadas foram 0,70; 1,00; 1,60; 2,30 e 3,00 L h⁻¹; os tempos de aplicação de água pelos emissores foram 1; 2; 3 e 4 h; com o valor do teor inicial de água do solo correspondente, para o solo selecionado, ao potencial matricial sob condição de solo úmido (-300 cm), ou seja, valor próximo da capacidade de campo do solo. Para testar a formação de faixa molhada estipularam-se quatro diferentes separações entre emissores, de 0,30 a 0,60 m, com intervalo de 0,10 m entre elas.

Considerou-se que a frente de molhamento do bulbo era a isolinha de umidade igual a 0,200 cm³ cm⁻³.

Ao utilizar o modelo Hydrus 2D, o fluxo de água no solo foi tratado bidimensionalmente para a determinação do seu movimento na fase de infiltração e consequente formação dos volumes de solo molhado simulados. Através da consideração das condições de contorno adequadas, foi possível modelar a formação de bulbos molhados isolados e sobrepostos e, por consequência, de uma faixa molhada ao longo da linha lateral de um sistema de irrigação por gotejamento superficial, permitindo estimar os valores do padrão de molhamento no bulbo molhado isolado (largura e profundidade máximas) como da faixa molhada formada (profundidades no eixo do emissor e no eixo intermediário entre os emissores).

A sobreposição longitudinal entre dois bulbos foi calculada por

$$S = W - S_e \quad (1)$$

$$Sp = \frac{2 \cdot S}{W} \cdot 100 \quad (2)$$

Em que, S é a distância de sobreposição; W é a largura (diâmetro) do bulbo; Se é o espaçamento entre emissores, e Sp é a distância de sobreposição, em %.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na simulação, utilizando o modelo Hydrus 2D, avaliou-se a formação dos bulbos molhados na fase de infiltração, obtidos pelo modelo para cinco vazões de emissor e quatro intervalos de tempo, observando-se desde a formação do bulbo isolado até a sua sobreposição (S e Sp) com o bulbo vizinho, formando uma faixa molhada, a partir de diferentes valores de espaçamento entre os gotejadores (Se).

Com a finalidade de ilustrar este trabalho, na Figura 2 é mostrado o resultado da simulação da formação de volume de solo molhado (bulbo molhado) e, conseqüentemente, de uma faixa molhada, utilizando o modelo Hydrus 2D, com aplicação de uma vazão de 2,30 L h⁻¹ ao final dos diferentes tempos de aplicação de água simulados.

Os resultados obtidos através das simulações pelo modelo apresentam diferenças entre as vazões e tempos aplicados. Os valores simulados pelo modelo de diâmetro (W) e profundidade (Z) alcançados para os tempos de aplicação de água em bulbos isolados e posterior valores calculados de sobreposição em função dos espaçamentos entre emissores são mostrados na Tabela 3. Os valores simulados pelo modelo de profundidades alcançadas no eixo do emissor (Ze) e no eixo intermediário entre os emissores (Zi), para as vazões e os tempos de aplicação de água, na formação de uma faixa molhada, em função dos espaçamentos entre emissores são mostrados na Tabela 4.

Analisando a Tabela 3, observa-se que, para os tempos e espaçamentos entre emissores utilizados na simulação de bulbos molhados isolados, a sobreposição entre os mesmos (Sp) alcançou valores variando de 0% a acima de 90%, com as diferentes vazões aplicadas. De acordo com Souza (2009) e Levien (2014), caso se deseje limitar o valor da sobreposição, pode-se alterar o espaçamento entre gotejadores ou modificar o tempo de aplicação de água, ou ainda, a vazão do gotejador.

Os dados da Tabela 4 servem para melhor explicar os resultados obtidos na tabela anterior, haja vista que os mesmos simulam o encontro dos bulbos formados por dois emissores próximos, mostrando o comportamento da frente de molhamento na intersecção entre os dois, e a profundidade da frente de molhamento neste eixo.

Este trabalho serve para corroborar a afirmação de Levien (2014) de que o uso de modelos possibilita interpretar e visualizar (entender?) o comportamento da formação da faixa molhada em diferentes tempos para uma mesma vazão e uma mesma separação entre emissores. Baseado nesta análise pode-se questionar se uma sobreposição de 20% ou 30% é ideal ou, quem sabe, pode-se chegar à conclusão que, para um determinado solo, a sobreposição ideal seja maior (talvez 50%). Recomendar-se-ia a realização de mais estudos, inclusive em três dimensões para reforçar tal suposição. Na literatura são encontradas boas justificativas para o uso de modelos, tais como, segundo Lubana & Narda (2001), que o uso de modelos matemáticos tem várias vantagens sobre outras técnicas de estimativa, como a relativa facilidade de utilização; os modelos incorporam conceitos aceitos da física do solo, para simular a infiltração; os parâmetros de entrada requeridos podem ser obtidos a partir da literatura; não é necessário, para obter estimativas preliminares de fluxo de água, medições in situ; pode ser contabilizada a variabilidade espacial de parâmetros do solo; 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.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos pela simulação de um solo com textura média (solo franco) com diferentes separações entre emissores mostram-se adequados à realidade e condizentes com a teoria, podendo ser aplicados no dimensionamento de instalações de irrigação por gotejamento superficial.

REFERÊNCIAS

- DASBERG, S.; OR, D. Drip irrigation. Springer-Verlag, Heidelberg, Germany. (Applied Agriculture), 1999. 170p.
- EVANS, R.G.; WU, I.; SMAJSTRALA, A.G. Microirrigation systems. In: HOFFMAN, G.J.; EVANS, R.G.; JENSEN, M.E.; MARTIN, D.L.; ELLIOTT, R.L. Design and operation of farm irrigation systems. 2. ed. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Chapter 17, p.632-683, 2007.
- LEVIEN, S.L.A. Simulação de formação de faixa molhada na irrigação por gotejamento superficial em solo franco. Irriga, Edição Especial 01, p.47-54, 2014.

LEVIEN, S.L.A.; MIRANDA, N.O. Caracterização da dinâmica da água em solos irrigados por gotejamento na região de fruticultura irrigada no Agropolo Assu-Mossoró. 2006. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró. Relatório Técnico, CNPq. 46p.

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

PEREIRA, L.S. Necessidades de água e métodos de rega. Publicações Europa-América, Mem Martins, Portugal. 2004. 312 p.

RODRIGO LÓPEZ, J.; HERNÁNDEZ ABREU, J.M.; PEREZ REGALADO, A.; GONZALEZ HERNANDEZ, J.F. Riego localizado. MAPA-YRIDA, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 1992. 405p.

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.

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, USSSL, 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. 2016a. 258p.

SIMUNEK, J.; van GENUCHTEN, M.T.; SEJNA, M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. *Vadose Zone Journal*, v.15, n.7, p.1-25, 2016b.

SNE, M. Drip Irrigation. Centre for International Agricultural Development Cooperation (CINADCO), Ministry of Agriculture, Israel. 2005. 132p.

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.

SUBBAIAH, R. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. Irrigation Science, v.31, n.3, p.225-258, 2013.

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.

ZUR, B. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. Irrigation Science, v.16, n.3, p.101-105, 1996.

Tabela 1. Dados médios do solo franco (loam soil), usado no estudo de dinâmica de água no solo irrigado por gotejamento superficial

Classe textural do solo	Fração Granulométrica			ds
	Argila	Silte	Areia	g cm^{-3}
franco (loam)	180	400	420	1,57

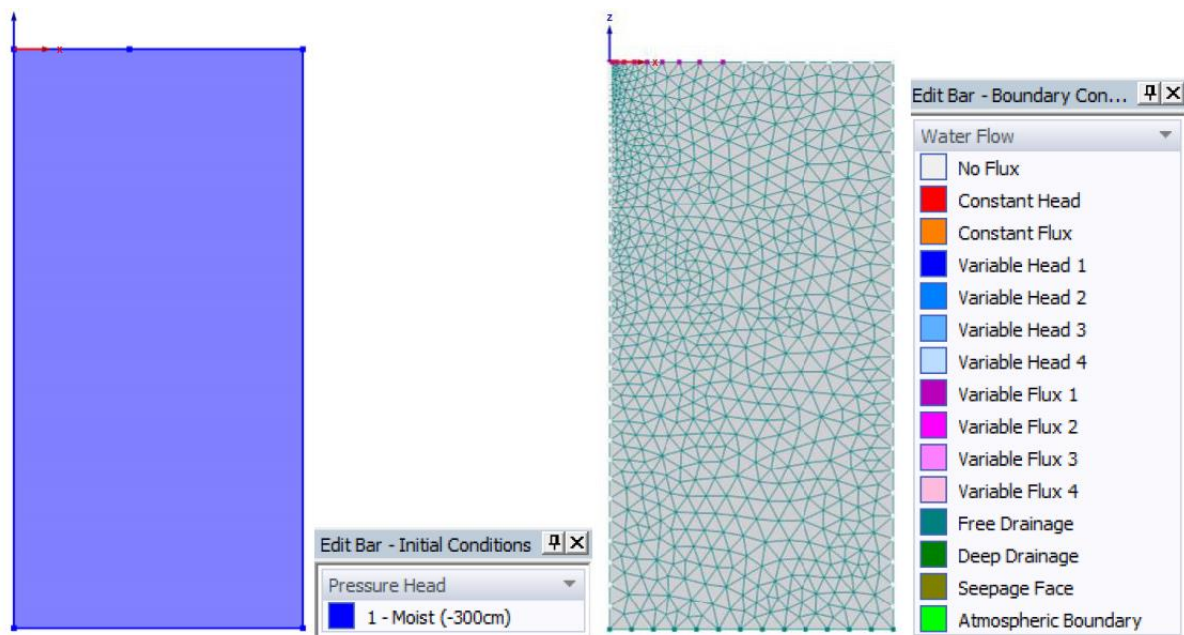
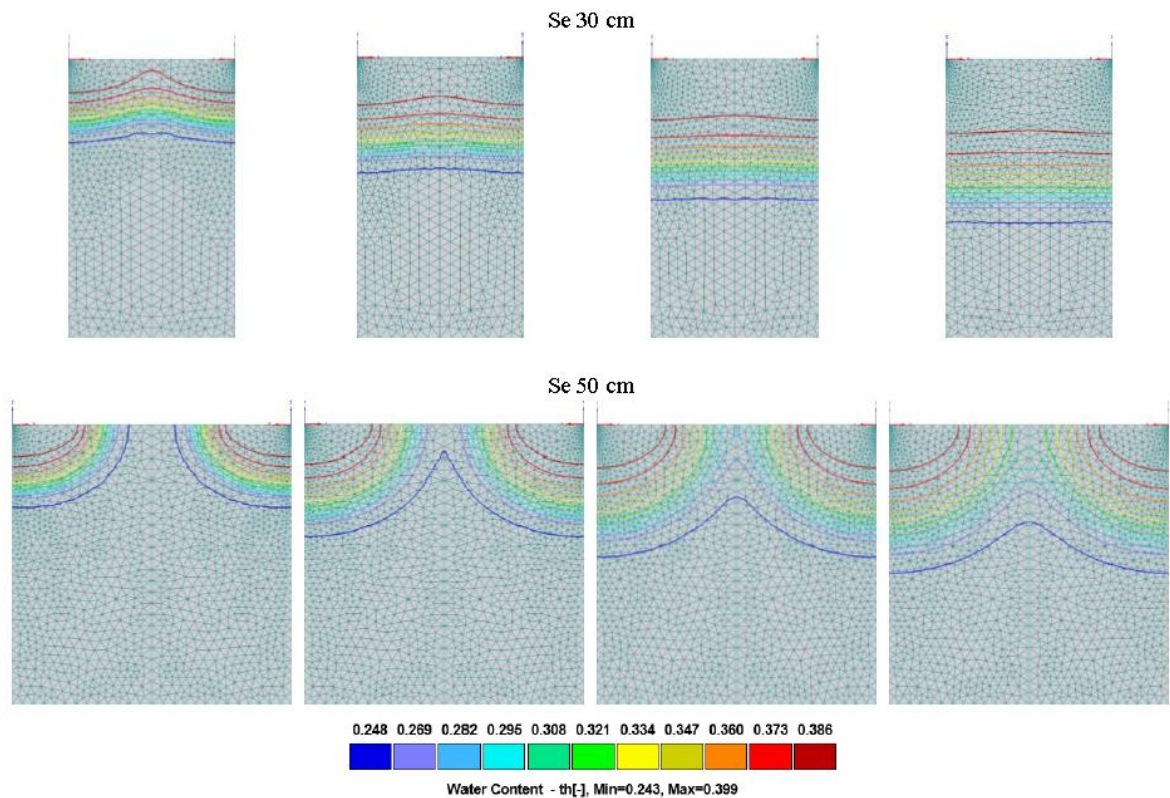


Figura 1. Esquema de condições iniciais e de limite usadas na simulação com o modelo Hydrus 2D

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

Classe textural do solo	Parâmetros				
	θ_r	θ_s	α	n	K_s
	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$		cm^{-1}	-	cm h^{-1}
franco (loam)	0,0609	0,3991	0,0111	1,4737	0,5017

**Figura 2.** Exemplos de resultados obtidos na simulação com o modelo Hydrus 2D, com vazão de $2,30 \text{ L h}^{-1}$, para a separação entre emissores (Se) de 30 e 50 cm, usando os tempos de aplicação de 1; 2; 3 e 4 h, respectivamente**Tabela 3.** Valores simulados de profundidade máxima (Z) e diâmetro máximo (W) na formação de bulbos molhados isolados, para vazões (q) de 0,70; 1,00; 1,60; 2,30 e $3,00 \text{ L h}^{-1}$ e tempos de aplicação de água (t) de 60; 120; 180 e 240 min, e valores calculados de sobreposição entre bulbos molhados (S e Sp) em função de espaçamento entre emissores (Se) de 30, 40, 50 e 60 cm, em solo franco (loam soil)

q	t	Z	W	Se							
				cm							
				30		40		50		60	
				S	Sp	S	Sp	S	Sp	S	Sp
L h^{-1}	min	cm	cm	%	cm	%	cm	%	cm	%	
0.70	60	13,6	35,7	5.7	31.93	-	-	-	-	-	-
0.70	120	18,7	44,3	14.3	64.56	4.3	19.41	-	-	-	-
0,70	180	22,4	51,1	21.1	82.58	11.1	43.44	1.1	4.31	-	-
0,70	240	25,1	56,0	26.0	92.86	16.0	57.14	6.0	21.43	-	-

1,00	60	14,3	40,0	10,0	50,00	-	-	-	-	-	-
1,00	120	19,5	48,2	18,2	75,52	8,2	34,02	-	-	-	-
1,00	180	23,3	53,4	23,4	87,64	13,4	50,19	3,4	12,73	-	-
1,00	240	26,1	58,42	28,4	97,30	18,4	63,06	8,4	28,83	-	-
1,60	60	14,6	41,6	11,6	55,77	1,6	7,69	-	-	-	-
1,60	120	20,0	48,9	18,9	77,30	8,9	36,40	-	-	-	-
1,60	180	23,5	54,1	24,1	89,09	14,1	52,13	4,1	15,16	-	-
1,60	240	26,4	59,2	29,2	98,65	19,2	64,86	9,2	31,08	-	-
2,30	60	14,6	41,8	11,8	56,46	1,8	8,61	-	-	-	-
2,30	120	20,0	49,5	19,5	78,79	9,5	38,38	-	-	-	-
2,30	180	23,6	54,9	24,9	90,71	14,9	54,28	4,9	17,85	-	-
2,30	240	26,4	59,3	29,3	98,82	19,3	65,09	9,3	31,37	-	-
3,00	60	14,7	42,1	12,1	57,48	2,1	9,98	-	-	-	-
3,00	120	19,9	49,5	19,5	78,79	9,5	38,38	-	-	-	-
3,00	180	23,5	54,4	24,4	89,71	14,4	52,94	4,4	16,18	-	-
3,00	240	26,3	59,0	29,0	98,31	19,0	64,41	9,0	30,51	-	-

Tabela 4. Valores simulados de profundidades no eixo do emissor (Ze) e no eixo intermediário entre os emissores (Zi) na formação de faixa molhada, para vazões (q) de 0,70; 1,00; 1,60; 2,30 e 3,00 L h⁻¹, tempos de aplicação de água (t) de 60; 120; 180 e 240 min, e espaçamento entre emissores (Se) de 30, 40, 50 e 60 cm, em solo franco (loam soil)

q	t	Se							
		cm							
		30		40		50		60	
L h ⁻¹	min	Ze	Zi	Ze	Zi	Ze	Zi	Ze	Zi
0,70	60	13,7	9,1	13,5	-	13,6	-	13,6	-
0,70	120	18,9	16,9	18,6	10,4	18,5	-	18,4	-
0,70	180	23,3	22,6	22,3	16,1	22,4	8,6	22,3	-
0,70	240	27,3	27,3	25,3	20,8	25,3	14,9	25,3	-
1,00	60	14,3	11,7	14,4	3,3	14,1	-	14,2	-
1,00	120	19,7	18,8	19,4	13,1	19,5	-	19,5	-
1,00	180	24,4	24,1	23,2	17,9	23,0	12,0	23,3	-
1,00	240	28,4	28,7	26,4	22,6	26,2	16,5	26,4	6,0
1,60	60	14,9	13,2	14,9	6,1	14,5	-	14,8	-
1,60	120	20,3	19,4	19,6	13,7	19,6	4,2	19,8	-
1,60	180	24,8	24,8	23,5	19,0	23,5	12,5	23,5	-
1,60	240	29,2	29,2	26,6	23,0	26,4	17,2	26,4	7,6
2,30	60	14,9	13,2	14,8	6,4	14,6	-	14,9	-
2,30	120	20,4	19,8	19,9	13,8	19,7	4,7	19,8	-
2,30	180	25,1	25,0	23,5	19,1	23,6	12,7	25,5	-
2,30	240	29,3	29,3	26,7	23,1	26,5	17,2	26,6	7,8
3,00	60	14,9	13,5	14,9	6,8	14,8	-	14,8	-
3,00	120	20,3	19,6	19,8	13,9	19,7	5,1	19,7	-
3,00	180	25,1	25,1	23,6	19,1	23,5	13,0	23,6	-
3,00	240	29,3	29,3	26,6	23,3	26,5	17,3	26,6	7,8