

DINÂMICA DE ÁGUA NO SOLO SOB IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SUPERFICIAL EM SOLO ESTRATIFICADO

S. L. A. Levien¹; A. H. F. Bezerra¹; L. E. V. de Arruda¹; C. E. Maia¹

RESUMO: A distribuição da umidade em torno dos emissores deve ser conhecida para gerir adequadamente os sistemas de irrigação por gotejamento superficial para molhar uniformemente a zona de raízes da cultura, que aumentarão a eficiência do uso de água e/ou fertilizantes e manter uma parte da superfície de solo seca para reduzir as perdas de água devido à evaporação. Nos últimos anos passou-se a usar modelos para avaliar o padrão de umidade do solo e as dimensões da frente de molhamento geradas por sistemas de irrigação de gotejamento superficial, e entre os modelos mais utilizados atualmente está o Hydrus 2D. Objetivou-se com este trabalho realizar simulações da dinâmica da água no solo na formação do bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial em exemplos de solos estratificados utilizando o modelo computacional Hydrus 2D. Para as simulações foram utilizados dados de três solos encontrados na área de produção de melão irrigado na região de Mossoró, RN, com quatro diferentes vazões e quatro diferentes tempos de aplicação. Os resultados obtidos demonstraram o potencial do Hydrus 2D para simular a formação do bulbo molhado que serve de suporte para o avanço nos estudos da dinâmica da água na irrigação.

PALAVRAS-CHAVE: Hydrus 2D; movimento de água no solo, manejo de irrigação.

SOIL WATER DYNAMICS UNDER SURFACE DRIP IRRIGATION IN LAYERED SOIL

ABSTRACT: The distribution of moisture around the emitters must be known in order to manage properly the surface drip irrigation systems to wet the crop root zone uniformly, which will increase the efficiency of the water use and/or fertilizer and to maintain a part of dry soil surface to reduce water losses due to evaporation. In recent years models have been used models to evaluate the soil moisture pattern and the wetting front dimensions generated by surface drip irrigation systems, and among the models currently used are Hydrus 2D. The objective of this paper was to perform simulations of soil water dynamics in wetted bulb formation under surface

¹ Centro de Engenharias, UFERSA, Mossoró-RN, e-mail: sergiolevien@ufersa.edu.br; andre.herman@yahoo.com; luizengeaa@hotmail.com; celsemy@ufersa.edu.br

drip irrigated using the computational model Hydrus 2D. For the simulations we used data from three soils found in melon production irrigated area in the region of Mossoró, RN, Brazil, with four different flow rates and four different application times. The obtained results demonstrated the potential of Hydrus 2D to simulate the wetted bulb formation that supports the advancement in irrigation water dynamics studies.

KEYWORDS: Hydrus 2D; soil water movement, irrigation management.

INTRODUÇÃO

A irrigação tem demonstrado ser uma das alternativas para o desenvolvimento socioeconômico de diversas regiões do mundo. Nos últimos tempos as técnicas de irrigação vêm se desenvolvendo de forma a melhorar o aproveitamento da água, que é um recurso cada vez mais escasso. Sendo assim, é importante estudar formas adequadas de dar um melhor uso a ela, pois a cultura tem que receber uma determinada quantidade de água que deve ser aplicada em momentos oportunos buscando o melhor aproveitamento da mesma (Levien et al., 2012).

O conhecimento da forma e do tamanho do volume de solo molhado formado sob irrigação por gotejamento superficial é um aspecto importante a considerar, pois ajudam os projetistas 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 e/ou fertilizantes (Dasberg & Or, 1999; Malek & Peters, 2011). Também, a distribuição mais exata possível da umidade em torno dos emissores deve ser conhecida para gerir adequadamente os sistemas de irrigação por gotejamento superficial para molhar uniformemente a zona de raízes da cultura (Rodrigo López et al., 1992).

Testes de campo são úteis para determinar o gerenciamento adequado da irrigação (Rodrigo López et al., 1992), mas devido ao alto custo e natureza demorada das experiências de campo, recomenda-se o uso de modelos de simulação de movimento da água no solo. O desempenho do modelo deve ser avaliado em diferentes condições e, se o desempenho do modelo for confirmado, ele pode ser usado para projetar e gerenciar o sistema de irrigação (Lubana & Narda, 2001; Subbaiah, 2013).

Nos últimos anos muitos pesquisadores desenvolveram e passaram a usar modelos matemáticos para avaliar o padrão de umidade do solo e as dimensões da frente de molhamento geradas por sistemas de irrigação de gotejamento superficial. 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 (Subbaiah, 2013), e dentre os apresentados na literatura podemos citar o modelo Hydrus (Simunek et al., 1999; 2006; 2016a), e também alguns outros como WetUp (Cook et al., 2003), DIPAC (Amin & Ekmaj, 2006) e PSIGS (Souza, 2009) e os modelos propostos por Schwartzman & Zur (1986), Malek & Peters (2011) e Levien et al (2011).

Entre os modelos mais utilizados atualmente está o modelo numérico Hydrus (Simunek et al., 1999; 2006; 2016a), um conhecido pacote de softwares que pode ser usado no ambiente Windows para simular o movimento de água, calor e/ou soluto em uma dimensão, ou duas e três dimensões em meios porosos variavelmente saturados.

Objetivou-se com este trabalho realizar simulações numéricas da dinâmica da água no solo na formação de bulbo molhado, sob irrigação por gotejamento superficial, em exemplos de solos estratificados utilizando o modelo computacional Hydrus 2D.

MATERIAL E MÉTODOS

Para as simulações foram utilizados exemplos de três solos comumente encontrados na área de produção de melão irrigado na região de Mossoró, RN, com quatro diferentes vazões dos emissores e quatro diferentes tempos de aplicação de água no solo.

Os solos escolhidos para as simulações foram caracterizados e detalhados por Medeiros et al. (2004). Os dados obtidos por eles foram utilizados por Maia (2005), Maia et al, (2010), Maia & Levien (2005) e Levien et al (2011), que avaliaram diferentes modelos matemáticos para estimar as dimensões e volume do bulbo molhado.

Os solos selecionados foram Cambissolo Háplico, Argissolo Vermelho-Amarelo e Neossolo Quartzarênico (Tabela 1).

A infiltração de água e conseqüente formação do volume de solo molhado (bulbo) foram simuladas usando o modelo Hydrus 2D (Simunek et al., 2016a). Assumindo diferentes horizontes ou camadas de solo e considerando os mesmos 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., 2016a; 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 1,0 m, e a dimensão vertical igual a 1,0 m, que incluiu a profundidade do solo em seus diferentes horizontes (camadas).

Assumiu-se que o fluxo de água lateral ao longo dos limites é 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 resumidos na Tabela 2.

As vazões de emissor selecionadas foram 1,0; 2,0; 3,0 e 4,0 L h⁻¹; os tempos de aplicação de água pelos emissores foram 1; 2; 3 e 4 h; e o valor do teor inicial de água no solo foi o correspondente, para o solo selecionado, ao potencial matricial sob condição de solo seco, ou seja, valor próximo da umidade residual.

Ao utilizar o modelo Hydrus 2D na simulação, 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 isolados. Através da consideração das condições de contorno adequadas, foi possível modelar a formação de bulbos molhados isolados nas condições de estratificação do perfil do solo propostas, permitindo estimar os valores do padrão de molhamento (largura e profundidade máximas).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores estimados neste trabalho, através de simulação com o modelo Hydrus 2D, de diâmetro máximo (W) e profundidade máxima (Z), são apresentados na Figura 2 e nas Tabelas 3 e 4.

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), utilizando o modelo Hydrus 2D, nos diferentes solos com aplicação de uma vazão de 2 L h⁻¹ ao final dos diferentes tempos de aplicação de água simulados.

Os resultados obtidos através das simulações pelo modelo apresentam diferenças entre os solos estudados, tanto para largura máxima (Tabela 3) como para profundidade máxima (Tabela 4).

Os valores de largura máxima (W), simulados pelo modelo Hydrus 2D, variaram de 45,1 a 68,0 cm, para o Cambissolo Háplico, de 40,8 a 65,7 cm, para o Argissolo Vermelho-Amarelo, e de 34,9 a 73,2 cm, para o Neossolo Quartzarênico.

Os valores de profundidade máxima (Z), simulados pelo modelo Hydrus 2D, variaram de 12,6 a 22,5 cm, para o Cambissolo Háplico, de 13,1 a 24,5 cm, para o Argissolo Vermelho-Amarelo, e de 19,8 a 44,4 cm, para o Neossolo Quartzarênico.

Observando-se a Figura 2 e os resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4, pode-se notar que o comportamento de formação do volume de solo molhado nos solos testado está coerente com a teoria. O solo de textura fina apresentou valores de diâmetro máximo maiores em relação aos solos de texturas média e grosseira, com o conseqüente aumento da vazão aplicada e do tempo de aplicação de água no solo. Também, o solo de textura fina apresentou menores valores de profundidade máxima em relação aos solos de texturas média e grosseira.

Alguns valores encontrados nas Tabelas 3 e 4 podem surpreender, mas podem ser explicados pela formação dos solos estudados, ou seja, são solos estratificados em que, muitas vezes, na interface entre os distintos horizontes ocorrem diferentes valores de condutividade hidráulica do solo saturado, levando a variações, principalmente, na largura do bulbo formado.

Este trabalho serve para corroborar a afirmação de Dasberg & Or (1999) de que o uso rotineiro de modelos numéricos ou analíticos de fluxo transitório para fins de design ainda é considerado pesado e impraticável devido à falta de informações sobre propriedades hidráulicas do solo, falta de treinamento (ou capacitação?) e objetivos hidrológicos mal definidos (o que constitui um padrão de molhamento "desejado" para uma cultura?). Mas na literatura são encontradas boas justificativas para o uso de modelos. Segundo Lubana & Narda (2001), o uso de 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; parâmetros de entrada requeridos podem ser facilmente obtidos a partir da literatura publicada; 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; 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 demonstram o potencial do Hydrus 2D, servindo de suporte para o avanço nos estudos da dinâmica da água na irrigação por gotejamento superficial em solos estratificados.

REFERÊNCIAS

- AMIN, M.S.M.; EKHMAJ, A.I.M. DIPAC-drip irrigation water distribution pattern calculator. 7th International Micro Irrigation Congress, PWTC, Kuala Lumpur, Malaysia, p.503-513, 2006.
- 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.
- DASBERG, S.; OR, D. Drip irrigation. Springer-Verlag, Heidelberg, Germany. (Applied Agriculture), 1999. 170p.
- 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, PGCult-UFMA, v.1, p.983-1003, 2011.
- LEVIEN, S.L.A.; MIRANDA, J.H.; BEZERRA, A.H.F. Estimativa de dimensões de volume de solo molhado na irrigação por gotejamento superficial em solo de textura média: condição inicial de solo seco. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v.6, n.2, p.127-135, 2012.
- 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.
- MAIA, C.E. Modelos matemáticos para estimativa da geometria do volume de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial no Agropolo Assu-Mossoró. Tese (Doutorado em Recursos Naturais), Universidade Federal de Campina Grande. 128p., 2005.
- MAIA, C.E.; LEVIEN, S.L.A.; MEDEIROS, J.F.; DANTAS NETO, J. Dimensões de bulbo molhado na irrigação por gotejamento superficial. *Revista Ciência Agronômica*, v.41, n.1, p.149-158, 2010.
- MAIA, C.E.; LEVIEN, S.L.A. Estimativa de dimensões de bulbo molhado em irrigação por gotejamento superficial aplicando modelo de superfície de resposta. *Ciência Rural*, v.40, n.6, p.1302-1308, 2010.
- 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. 89p.

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

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.

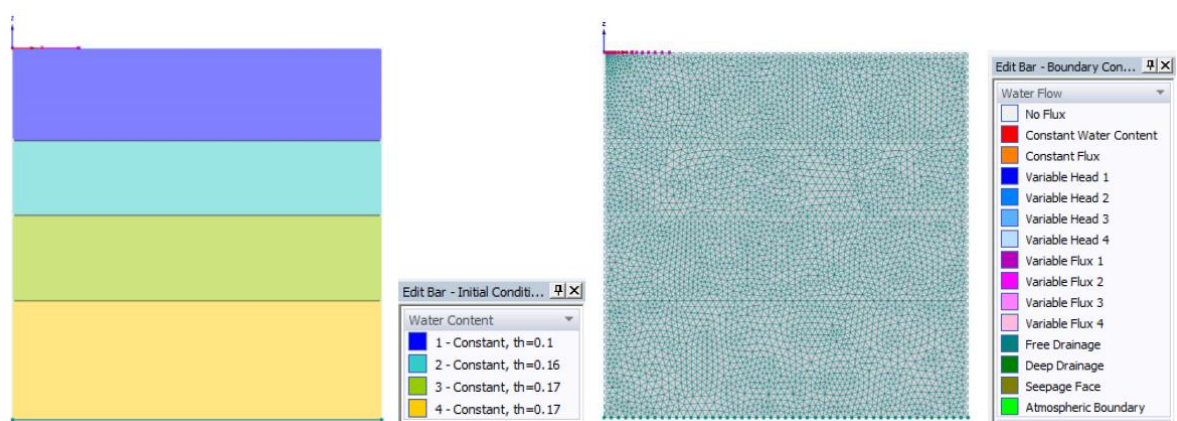
SOUZA, L.A.A. Fluxo tridimensional de água no solo: aplicação de volumes finitos na simulação da irrigação por gotejamento superficial. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró. 128p., 2009.

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.

Tabela 1. Dados dos solos selecionados para o estudo de dinâmica de água no solo irrigado por gotejamento superficial

Solo	Horizonte/Camada cm	Fração Granulométrica			ds g cm ⁻³	Classe Textural
		Argila	Silte	Areia		
Cambissolo Háplico	Ap (0-25)	400	244	356	1,33	Francoargilosa
	B ₁ (25-45)	390	284	326	1,28	Francoargilosa
	B ₂ (45-68)	417	259	324	1,25	Argila
	B ₃ (68-90)	369	275	356	1,24	Francoargilosa
Argissolo Vermelho- Amarelo	Ap1 (0-25)	195	40	765	1,58	Francoarenosa
	Ap2 (25-42)	189	40	771	1,79	Francoarenosa
	B1 (42-53)	380	91	529	1,72	Argiloarenosa
	B2 (53-80+)	407	120	473	1,64	Argila
Neossolo Quartzarênico	Ap (0-20)	21	72	907	1,65	Areia
	C1 (20-47)	36	84	880	1,67	Areia franca
	C2 (47-75+)	63	107	830	1,72	Areia franca

**Figura 1.** Esquema de condições iniciais e de limite usadas na simulação com o modelo Hydrus 2D**Tabela 2.** Parâmetros das equações de retenção de água no solo do modelo de van Genuchten-Mualem, dos diferentes solos estratificados utilizados no estudo de dinâmica de água no solo irrigado por gotejamento superficial

Solo	Horizonte/Camada cm	Parâmetros				
		θ_r	θ_s	α	n	Ks
		cm ³ cm ⁻³		cm ⁻¹	-	cm h ⁻¹
Cambissolo Háplico	Ap (0-25)	0,0913	0,4723	0,0164	1,3613	0,7492
	B ₁ (25-45)	0,0922	0,4844	0,0149	1,3893	0,8979
	B ₂ (45-68)	0,0955	0,4981	0,0165	1,3668	1,1217
	B ₃ (68-90)	0,0910	0,4913	0,0149	1,4026	1,0842
Argissolo Vermelho- Amarelo	Ap1 (0-25)	0,0628	0,3809	0,0263	1,4483	1,5121
	Ap2 (25-42)	0,0545	0,3185	0,0302	1,3441	0,5683
	B1 (42-53)	0,0701	0,3608	0,0292	1,1671	0,2358
	B2 (53-80+)	0,0770	0,3860	0,0256	1,1941	0,2771
Neossolo Quartzarênico	Ap (0-20)	0,0453	0,3408	0,0371	2,7405	12,7046
	C1 (20-47)	0,0443	0,3368	0,0387	2,3216	7,5179
	C2 (47-75+)	0,0424	0,3255	0,0418	1,7915	2,8938

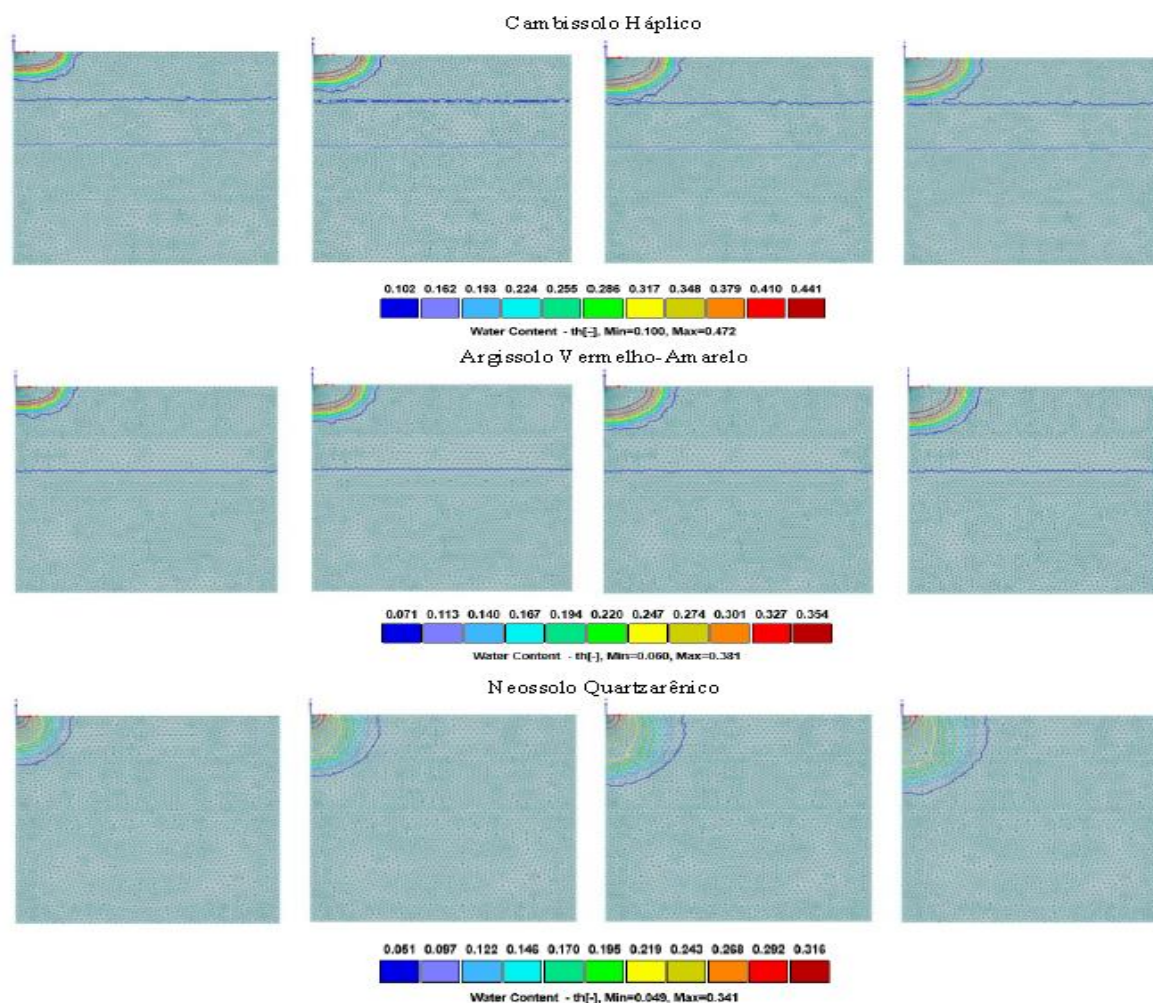


Figura 2. Exemplos de resultados obtidos na simulação com o modelo Hydrus 2D, para os diferentes solos com vazão de 2 L h⁻¹ usando os tempos de aplicação de 1; 2; 3 e 4 h, respectivamente

Tabela 3. Valores simulados de diâmetro máximo (W), do bulbo molhado gerado, em função da vazão (q) e do tempo de aplicação de água (t), na irrigação por gotejamento superficial em solos estratificados usando o modelo Hydrus 2D

Solo	t	q			
		L h ⁻¹			
		1,0	2,0	3,0	4,0
		W			
		cm			
Cambissolo Háplico	1	45,1	47,4	56,8	53,6
	2	49,3	52,9	60,8	57,8
	3	52,6	56,8	64,4	60,8
	4	54,6	59,1	68,0	64,7
Argissolo Vermelho-Amarelo	1	40,8	46,0	52,9	49,0
	2	44,1	49,6	58,1	54,2
	3	48,3	53,9	62,1	58,1
	4	51,3	56,2	65,7	61,7
Neossolo Quartzarênico	1	34,9	42,1	45,7	48,0
	2	44,4	51,9	54,9	59,5
	3	50,0	57,8	62,4	67,0
	4	54,6	63,1	69,6	73,2

Tabela 4. Valores simulados de profundidade máxima (Z), do bulbo molhado gerado, em função da vazão (q) e do tempo de aplicação de água (t), na irrigação por gotejamento superficial em solos estratificados usando o modelo Hydrus 2D

Solo	t	q			
		L h ⁻¹			
		1,0	2,0	3,0	4,0
Z					
h		cm			
Cambissolo Háplico	1	12,6	12,7	12,7	13,7
	2	16,8	16,8	17,3	17,5
	3	19,3	19,8	20,3	20,4
	4	21,4	22,0	21,9	22,5
Argissolo Vermelho- Amarelo	1	13,2	13,1	13,7	14,0
	2	17,0	17,5	18,5	18,5
	3	19,8	20,6	22,4	20,7
	4	22,2	23,0	24,5	23,7
Neossolo Quartzarênico	1	19,8	23,2	25,3	26,6
	2	24,5	28,9	32,2	34,5
	3	28,9	33,3	37,3	39,7
	4	31,5	36,8	41,3	44,4