

Lopes da Silva, José Roberto; de Assunção Montenegro, Abelardo Antônio; Normandia Monteiro, Adriano Luiz; de Paula e Silva Junior, Valdemir

Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano

Revista Brasileira de Ciências Agrárias, vol. 10, núm. 2, -, 2015, pp. 293-303

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Pernambuco, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=119039562020>

## Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano<sup>1</sup>

José Roberto Lopes da Silva<sup>2</sup>, Abelardo Antônio de Assunção Montenegro<sup>2</sup>,  
Adriano Luiz Normandia Monteiro<sup>2</sup>, Valdemir de Paula e Silva Junior<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Parte da tese de doutorado do primeiro autor a ser defendida à Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Universidade Federal Rural de Pernambuco

<sup>2</sup> Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia Agrícola, Área de Recursos Hídricos, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, CEP 50710-470, Recife-PE, Brasil. E-mail: rlopes.s@gmail.com; abelardo.montenegro@yahoo.com.br; ad\_normandia@hotmail.com; depaulajr22@yahoo.com.br

### RESUMO

A umidade do solo é uma variável indispensável para o entendimento de muitos processos hidrológicos e naturais que atuam em diferentes escalas espaciais e temporais. Há uma carência de informações da dinâmica de umidade do solo sob diferentes condições de cobertura na região semiárida. O monitoramento e a modelagem dessa variável ao longo do tempo tornam-se indispensáveis, para subsidiar ações de manejo e conservação do solo e água. Dentro deste contexto, o presente trabalho teve por objetivo modelar a dinâmica de umidade do solo através do Modelo Hydrus-1D, a partir de medições por meio de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) em parcelas experimentais, sob condição de cobertura natural e solo descoberto, no município de Pesqueira, PE, Brasil. O modelo Hydrus-1D apresentou adequado desempenho para variável avaliada, segundo os índices aplicados. Os resultados asseguram que é possível utilizar o modelo para estimativa da umidade do solo em escala diária para o tipo de solo e condições de cobertura investigadas. A eficiência do modelo pelo índice do Nash-Sutcliffe variou de 72 a 82%, com Erro Quadrático Médio máximo de 3% e índice de concordância superior a 90%.

**Palavras-chave:** Hydrus, modelagem, TDR, umidade do solo

***Modeling of soil moisture dynamics in different coverage conditions in the semiarid***

### ABSTRACT

Soil moisture is a crucial variable for understanding many natural and hydrological processes that operate at different spatial and temporal scales. There is a lack of information about soil moisture dynamics under different land cover conditions in semiarid regions. Monitoring and modeling this variable over time become essential to support management practices and conservation of soil and water. In this context, this work aimed to model the dynamics of soil moisture applying the Hydrus-1D model from measurements using time-domain reflectometer (TDR), in experimental plots under condition natural coverage and bare soil in the city Pesqueira, PE, Brazil. The Hydrus-1D model presented adequate performance for variable evaluated according to the applied indexes. Results point out that it is possible to use the model to estimate soil moisture at daily basis for the type of soil and cover conditions investigated. The model efficiency by Nash- Sutcliffe index ranged from 72 to 82 %, with a maximum mean squared error of 3% and concordance index higher than 90%.

**Key words:** Hydrus, modeling, TDR, soil moisture

## Introdução

O monitoramento da dinâmica de umidade do solo é de suma importância para o planejamento agrícola e uso do solo, uma vez que a mesma constitui-se em uma das variáveis mais importantes nos processos climatológicos e hidrológicos em diferentes escalas espaciais e temporais, bem como para estudos hidroagrícolas de infiltração, irrigação, drenagem, e para utilização na modelagem hidrológica e sedimentológica (Entin et al., 2000; Ávila et al., 2010).

Lei et al. (2011) reforçam que a variação espaço-temporal da umidade do solo é causada por um efeito abrangente de vegetação, fenômenos meteorológicos (principalmente chuvas), terreno (declividade, orientação de vertentes, altitude e diferenciação geográfica) e atividades agrícolas em diferentes escalas.

Em áreas onde a disponibilidade de água no solo se torna restritiva, o monitoramento hídrico do solo adquire maior significância, e a necessidade do uso racional dos recursos hídricos aliados ao avanço da eletrônica tem contribuído para a intensificação dos estudos do monitoramento da água no solo (Araújo et al., 2001; Elaiuy et al., 2009). O uso da instrumentação voltada para obtenção de informações sobre o sistema água-solo é muito importante. Um método de quantificação ideal da água do solo deve basear-se numa propriedade física, dependente apenas do seu conteúdo e produzir respostas direta, rápida e confiável (Elaiuy et al., 2009).

Dentre os métodos para a estimativa do teor de água no solo, a técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) vem-se destacando em relação aos demais, principalmente por ser um método rápido, não destrutivo e que possibilita a automação da aquisição dos dados (Bizari et al., 2011).

Os altos custos envolvidos nas pesquisas de campo e os avanços computacionais têm contribuído para ampliar a utilização dos modelos matemáticos, possibilitando simulação do movimento de água e soluto no solo. Porém, vale ressaltar que as medições de campo são indispensáveis, uma vez que os modelos matemáticos necessitam de calibrações e validações locais (Rivera et al., 2008).

Existe uma grande variedade de modelos analíticos e numéricos para prever os processos de transferência e o movimento de água e solutos no solo, e o surgimento desses modelos nas últimas décadas se deve ao progresso na compreensão conceitual das descrições matemáticas dos processos de transporte de solutos e movimento de água no solo em região não saturada. Esses modelos são baseados na equação de Richards para o fluxo saturado/insaturado da água no solo e na equação de convecção-dispersão (CDE) para o transporte de solutos (Gonçalves et al., 2007; Simunek et al., 2009).

O modelo matemático Hydrus é um dos mais usados na estimativa do processo de percolação de água e lixiviação de compostos químicos na zona vadosa do solo, particularmente em estudos de recarga e contaminação de aquíferos (Chaves, 2009), e pode ser utilizado para analisar o movimento de água e solutos em meios não saturados, parcialmente saturados e/ou totalmente saturados, podendo a região de fluxo ser composta

de solos não uniformes. O fluxo é controlado pelas condições de contorno (carga hidráulica, condições atmosféricas e drenagem livre), e as equações que regem o fluxo e o transporte são resolvidas numericamente por elementos finitos (Simunek et al., 2009).

O modelo Hydrus-1D vem sendo utilizado mais frequentemente em estudos de dinâmica de água e solutos em colunas de solo. Poucos trabalhos têm sido desenvolvidos em condições experimentais de campo. Dentre os trabalhos experimentais de campo, pode-se citar: Monteiro et al. (2009) que avaliaram a lavagem parcial de sais em Neossolo Flúvico em lote irrigado no município de Pesqueira; Kanzari et al. (2012) que utilizaram o modelo Hydrus-1D para investigar o risco de salinização e a dinâmica de umidade em região semiárida da Tunísia, e Zeng et al. (2014) que aplicaram o Hydrus-1D na análise de lixiviação de sais em área irrigada na China.

Vale ressaltar que a região semiárida do Brasil em particular ainda é carente de informações da dinâmica de água no solo sob diferentes condições de cobertura, e apesar de ser o único bioma brasileiro cujos limites estão restritos ao território nacional, pouca atenção tem sido dada à conservação da diversificada paisagem da Caatinga (Bezerra et al., 2013). Dentro deste contexto o monitoramento e a modelagem temporal tornam-se indispensáveis para subsidiar ações de manejo e conservação do solo e água, e para quantificar os componentes do balanço hídrico, uma vez que, a disponibilidade de água no solo está diretamente ligada disponibilidade hídrica na atmosfera que é controlada por processos de evaporação e transpiração.

A umidade do solo tem grande efeito na magnitude da temperatura da superfície em virtude da sua marcante influência no armazenamento de energia térmica, e sua variação no solo promove mudanças significativas no balanço da energia da superfície. Desta forma, a umidade do solo é um parâmetro essencial na modelagem de processos da superfície e hidrológicos (Zeng et al. 2004; Lopes et al., 2011).

Dentro deste contexto, o presente trabalho teve por objetivo modelar a dinâmica de umidade do solo através do Modelo Matemático Hydrus-1D, a partir de medições com TDR, em parcelas experimentais sob condições de cobertura natural e solo descoberto em escala de parcela, no município de Pesqueira-PE, região semiárida do Nordeste Brasileiro.

## Material e Métodos

### Área de estudo

O estudo foi realizado em uma unidade experimental situada nas seguintes coordenadas UTM: 0733983 e 9071150, na Bacia do Mimoso, município de Pesqueira-PE. A Bacia do Mimoso encontra-se inserida na Bacia Representativa do Alto Ipanema, que é uma das sub-bacias investigadas pela Rede de Hidrologia do Semiárido (REHISA). A Bacia Representativa do Alto Ipanema é uma sub-bacia do sistema do Rio Ipanema, em sua porção ocidental mais a montante, e abrange parte dos municípios de Arcoverde e de Pesqueira, do Estado de Pernambuco-Brasil, numa área de 194,82 km<sup>2</sup> (Figura 1).

De acordo com Silva et al. (2012), os solos de referência da Bacia Representativa do Alto Ipanema são: Argissolos

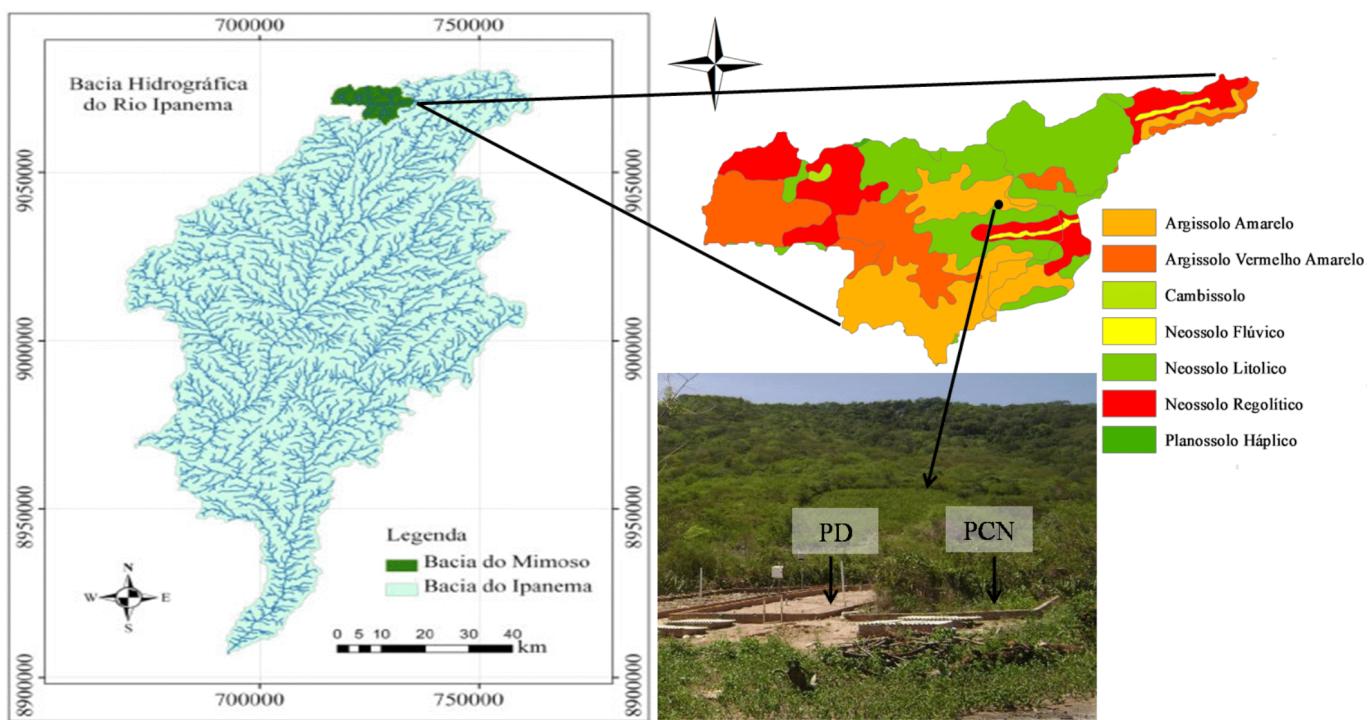


Figura 1. Bacia hidrográfica do Ipanema com destaque para Bacia do Mimosa

Amarelo, Argissolos Vermelho-Amarelo, Neossolos Flúvico, Regolítico e Litólico. Na Tabela 1 são apresentadas as características físicas e hidráulicas do solo da área investigada, as quais são detalhadas em Silva et al. (2012). As parcelas experimentais com dimensões de 4,5 m e 11,0 m (no sentido do declive) foram instaladas em dezembro de 2009, perfazendo uma área de 49,5 m<sup>2</sup>. Após a delimitação das parcelas, foi mantida uma parcela com solo descoberto e outra em processo de regeneração da cobertura natural e/ou espontânea.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima na região é do tipo BSsh (extremamente quente, semiárido). A precipitação média anual, conforme dados histórico local (1910 a 2012) é de 671,90 mm (Silva et al., 2013). De acordo com os dados normais climatológicos, a evaporação total anual é de 1.589,80 mm, a temperatura média de 24,70 °C, máxima de 29,0 °C e mínima de 18,5 °C, respectivamente. Conforme o índice de aridez em média mais de 60% de suas áreas apresenta baixa susceptibilidade à desertificação, com presença de manchas de média susceptibilidade (Santos & Galvâncio, 2013). A vegetação predominante é a caatinga hipoxerófila, cactáceas e bromeliáceas (Montenegro & Montenegro, 2004).

### Monitoramento Hidrológico

#### A) Umidade do solo

O monitoramento da umidade do solo foi realizado através de sondas TDR (CS616 da Campbell Scientific), instaladas na profundidade de 20 cm (Figura 2B). A utilização das sondas

TDR permitiu um monitoramento diário contínuo. O período de investigação foi de 01 de Janeiro de 2012 a 31 de Maio de 2013. O monitoramento foi realizado em duas parcelas experimentais com diferentes condições de cobertura (Parcela com Cobertura Natural-PCN e Parcela com solo Descoberto-PD). Em cada parcela foram instaladas duas sondas TDR. No presente trabalho, foram considerados os valores médios.

O sistema de coleta e armazenamento de dados foi composto por equipamentos da Campbell Scientific (TDR100, multiplexador SDMX50 e um datalogger CR1000) (Figura 2A).

Na Figura 3 é apresentada uma vista parcial das condições de coberturas investigadas (cobertura natural e solo descoberto). A vegetação natural e/ou espontânea predominante é composta por caatinga arbustiva rala de pequeno porte, com presença de

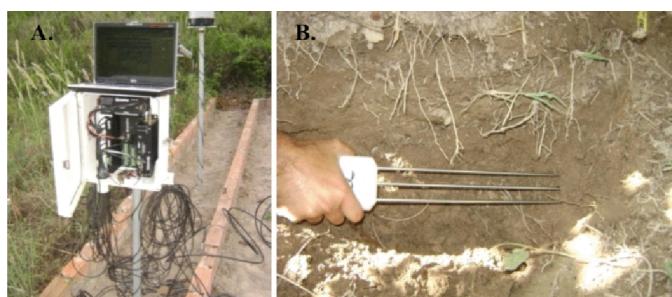


Figura 2. Sistema de aquisição e armazenamento de dados (A), Instalação de Sonda TDR na parcela com cobertura natural (B)

Tabela 1. Características físicas e hidráulica da área de estudo

Tipo de solo	Horiz.	Prof. (cm)	% de Areia	% de Argila	% de Silte	% Argila natural	D <sub>p</sub> (g cm <sup>-3</sup> )	D <sub>s</sub> (g cm <sup>-3</sup> )	K <sub>s</sub> (cm dia <sup>-1</sup> )
Argissolo	Ap	0 - 17	34,24	29,09	36,67	13,53	2,66	1,73	321,36
Amarelo	Bt1	17 - 92	24,91	40,43	34,67	19,20	2,70	1,74	175,68
Eutrófico típico	Bt2	92 - 150	18,24	43,09	38,67	18,53	2,72	1,75	195,6

D<sub>p</sub> - densidade das partículas, D<sub>s</sub> - densidade do solo e K<sub>s</sub> - Condutividade hidráulica do solo saturado



Figura 3. Variabilidade temporal da cobertura vegetal da área em estudo, nas condições de solo coberto e descoberto

palma forrageira (*Opuntia cochenillifera*), marmeiro (*Croton sonderianus*) e jurema-preta (*Mimosa hostilis* Benth.). Na Figura 3 pode-se observar dinâmica sazonal ao longo do ano de 2012.

#### B) Variáveis Climatológicas

Os dados climáticos foram medidos através de Estação Climatológica Total Automática (Campbell Scientific) instalada nas coordenadas UTM: long. 0735098 e lat. 9071400. A estação é dotada de um conjunto de sensores e uma interface de comunicação para transferência de dados, que incluem: um anemômetro para medir a velocidade e direção do vento, um pluviômetro, um sensor de temperatura e umidade relativa do ar e um piranômetro para medir a radiação. O monitoramento de cada variável é realizado de hora em hora, diariamente e obtido através da determinação da média dos dados coletados por 24 h. A evapotranspiração potencial diária foi estimada através da equação de FAO-Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

#### Modelo Hydrus-1D

##### A) Formulação matemática

O modelo Hydrus-1D resolve uma versão modificada da equação de Richards, conforme a Eq. 1:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (1)$$

em que  $h$  é a carga hidráulica (L),  $\theta$  é o conteúdo volumétrico de água no solo ( $L^3 L^{-3}$ ),  $t$  é o tempo (T),  $K$  é a condutividade hidráulica ( $L T^{-1}$ ),  $x$  é a coordenada espacial (L),  $\alpha$  é o ângulo de

direção do fluxo e o eixo vertical ( $\alpha = 0^\circ$  para fluxo vertical,  $\alpha = 90^\circ$  para fluxo horizontal, e  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  para fluxo inclinado) e  $S$  é o termo de extração de água ( $L^3 L^{-3} T^{-1}$ ).

O modelo utiliza a equação de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980) para determinar a relação entre condutividade não saturada, o teor de umidade volumétrica e o potencial mátrico do solo, como segue (Eq. 2):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[ 1 + (\alpha |h|^n) \right]^m} \quad (2)$$

em que  $\theta_r$  é a umidade residual ( $m^3 m^{-3}$ ),  $\theta_s$  a umidade na saturação ( $m^3 m^{-3}$ ), e  $n$  e  $m$  são os parâmetros de ajuste do modelo.

O parâmetro empírico de ajuste da curva  $m$  é obtido pela relação  $m = 1 - (1/n)$ , proposta por Mualem (1976). A função de condutividade hidráulica é escrita como:

$$K = K_s S_e^l \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (3)$$

em que  $x$  é o parâmetro de inclinação (Mualem, 1976), sendo adotado o valor de 0,5, para a maioria dos solos, e  $K_s$  é a condutividade hidráulica do solo saturado.

#### B) Parâmetros de entrada e calibração do modelo

Para inserir os dados de precipitação no modelo, consideraram-se as perdas por interceptação e escoamento superficial, na parcela com cobertura de caatinga (natural). Para estimativa da interceptação, utilizou-se as Classes de Precipitação (CP) e perdas por interceptação média (% da precipitação total) proposta por Izidio et al. (2013), conforme Tabela 2.

A estimativa do volume escoado foi realizada através de caixas coletoras de enxurrada instaladas no final de cada parcela experimental. Após um evento de chuva realizava-se a leitura do nível da caixa, e de posse da área da mesma, encontrava-se o volume total escoado por  $m^2$ . Logo, a precipitação efetiva que chegou ao solo foi determinada pela Eq. 4.

$$P_{\text{efetiva}} = P_{\text{total}} - I - ES \quad (4)$$

em que  $P$  é a precipitação (mm),  $I$  é a interceptação (% em mm da precipitação) e  $ES$  é o escoamento superficial (mm).

As medidas de campo de condutividade hidráulica do solo saturado foram determinadas por Silva et al. (2012), utilizando o permeímetro de Guelph (Tabela 1). A curva de retenção de água no solo foi determinada em laboratório por meio do

Tabela 2. Classes de Precipitação (CP) e perdas por interceptação média (% da precipitação total)

Classes de precipitação (CP)	Interceptação (%)	Interceptação adotada (%)
CP > 10 mm	27,6 ± 18,3	20,0
10 ≤ CP < 20 mm	9,9 ± 7,5	9,9
20 ≤ CP < 40 mm	12,3 ± 7,5	10,0
CP ≥ 40 mm	14,4 ± 8,8	14,4

Fonte: Izidio et al. (2013)

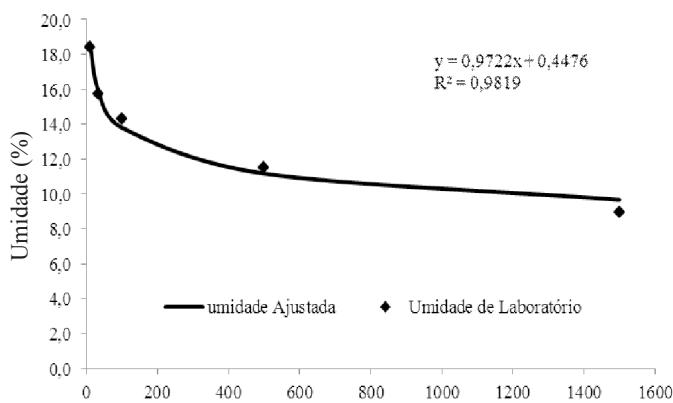


Figura 4. Curva característica do Argissolo Amarelo Distrófico típico

Tabela 3. Parâmetros de ajuste estimados pela equação de van Genuchten (1980) e coeficiente de determinação entre a umidade de laboratório e ajustada pelo modelo

$\theta_s$ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	$\theta_r$ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	$\alpha_{vG}$ $\text{kPa}^{-1}$	$n$	$m$	$R^2$
0,30	0,02	3,631	1,132	0,117	0,9819

$\theta_s$  - umidade de saturação;  $\theta_r$  - umidade residual;  $\alpha_{vG}$  - parâmetro alfa de van Genuchten;  $n$  e  $m$  - parâmetros de ajuste experimental

extrator de Richards e ajustada pelo modelo de van Genuchten (Figura 4). Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros de ajuste estimados para o modelo de van Genuchten (1980).

As simulações nas parcelas experimentais foram realizadas para um período de um ano e cinco meses (2012 a 2013). Foram utilizados 366 dias para calibração e ajuste (ano de 2012) e 151 dias para validação (ano de 2013).

Com base nos dados de campo (textura do solo, curva característica e condutividade hidráulica), realizou-se o processo de calibração do modelo. Os parâmetros calibrados podem ser vistos na Tabela 4. Para condição de contorno superior, utilizou-se fluxo variável de eventos diários de chuva e de evapotranspiração, para condição de contorno inferior considerou-se a drenagem livre e para inicialização do modelo utilizou-se a primeira leitura umidade medida pela sonda TDR. Para discretização dos dados, considerou-se apenas a camada subsuperficial (0-30 cm). De acordo com Santos et al. (2011), a área experimental apresenta declividade média de 5%. Os dados de textura (Tabela 1) foram inseridos no Hydrus-1D. Posteriormente, realizou-se a calibração através de ajustes dos parâmetros do modelo de van Genuchten, e da condutividade hidráulica do solo saturado (Tabela 4).

Após o processo de calibração, os valores da umidade residual, da umidade de saturação, dos parâmetros da equação de van Genuchten e da tortuosidade não diferiram para as diferentes coberturas, uma vez que os dados de entrada (textura do solo, curva característica e condutividade hidráulica) foram

os mesmos, em função das parcelas experimentais estarem lado a lado e terem sido instaladas em dezembro de 2009, o curto período de implantação não promoveu mudanças significativas nas características físicas do solo. Adicionalmente esses valores podem ser explicados pela homogeneidade da mancha de solo no local de estudo. Incremento apenas foi evidenciado na condutividade hidráulica, provavelmente por conta da presença do sistema radicular da cobertura natural existente.

### C) Considerações para estimativa de fluxo na superfície

A condição de contorno superior foi especificada conforme a precipitação, e os valores particionados da evapotranspiração em transpiração e evaporação do solo descoberto. Para estimativa da evaporação do solo na condição de cobertura natural, utilizou-se os valores de saída de evaporação acumulada estimada pelo modelo para condição de solo descoberto, e o índice de área foliar. Tais valores foram gerados durante a calibração, na qual se utilizaram os dados de evapotranspiração potencial estimados por Penman-Monteith. De posse dos dados de evaporação do solo, foi possível dividir os processos de transpiração e evaporação para condição do solo vegetado conforme o modelo proposto por Vanclooster et al. (1994). O modelo estima a evaporação potencial, em função do índice de área foliar (IAF), e da evapotranspiração potencial da cultura, segundo a Eq. (5) e (6):

$$Ep = \exp^{(-0,6IAF \cdot ET_p)} \quad (5)$$

$$Tp = ET_p - Ep \quad (6)$$

em que IAF é o índice de área foliar,  $ET_p$  é a taxa de evapotranspiração potencial ( $\text{L T}^{-1}$ ),  $Ep$  é a taxa de evaporação potencial ( $\text{L T}^{-1}$ ) e  $Tp$  é a taxa de transpiração potencial ( $\text{L T}^{-1}$ ).

No presente trabalho, considerou-se diferentes IAF para parcela com cobertura natural, em que foram calibrados valores após os primeiros eventos de chuva, uma vez que a caatinga responde rapidamente a eventos chuvosos e apresenta variação sazonal do índice de área foliar (Tabela 5).

Admitindo-se que o solo em condição sem cobertura vegetal perde mais água para atmosfera, para fins de calibração

Tabela 5. Valores de índice de área foliar calibrados em função da ocorrência de chuva

2012		2013	
Dias	IAF	Dias	IAF
01 a 18	0,30	01 a 72	0,30
19 a 199	0,95	73 a 115	0,95
200 a 243	0,40	116 a 151	0,80
244 a 366	0,70		

Tabela 4. Parâmetros de calibração do modelo para as diferentes condições de cobertura

Cobertura	Ano	$\theta_r$ ( $\text{cm cm}^{-1}$ )	$\theta_s$ ( $\text{cm cm}^{-1}$ )	$\alpha_{vG}$	$n$	$K_s$ ( $\text{cm dia}^{-1}$ )	$I$
Solo Descoberto	2012	0,028	0,38	0,028	1,489	180	0,5
	2013	0,028	0,38	0,028	1,489	180	0,5
Cobertura Natural	2012	0,028	0,38	0,028	1,489	200	0,5
	2013	0,028	0,38	0,028	1,489	200	0,5

$\theta_r$  - umidade residual do solo,  $\theta_s$  - umidade de saturação do solo,  $\alpha_{vG}$  e  $n$  - parâmetros da equação de van Genuchten,  $K_s$  - Condutividade hidráulica do solo saturado,  $I$  - parâmetro de tortuosidade da função de condutividade hidráulica.

considerou-se que a taxa de evaporação na parcela nessa condição superou a evapotranspiração potencial em 10%.

#### D) Avaliação do desempenho do modelo

O modelo foi avaliado com base no Erro Quadrático Médio (RMSE), Coeficiente de Concordância (d) e a Eficiência de modelagem Nash-Sutcliffe (NSE) (Zeng et al., 2014).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2 \right]} \quad (7)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|X_i - m| + |Y_i - m_e|)^2} \quad (8)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - m)^2} \quad (9)$$

em que  $X_i$  é o valor medido,  $Y_i$  é o valor estimado,  $n$  é o número de observações,  $m$  é o valor médio dos dados medidos e  $m_e$  é o valor médio dos dados estimados.

Os valores do Erro Quadrático Médio (RMSE), do Índice de Concordância (d) e da Eficiência de modelagem Nash-Sutcliffe (NSE) medem a precisão do modelo, e variam de 0,0 a 1,0. Quanto mais próximo à zero (0) for o valor de RMSE, mais preciso é o modelo. Já o índice de concordância (d) e a Eficiência de modelagem Nash-Sutcliffe (NSE) indicam que o modelo é mais preciso quando os mesmos aproximam-se de um (1).

## Resultados e Discussão

### Dinâmica das variáveis climáticas e da umidade do solo

Na Figura 5 é apresentada a evolução temporal da precipitação e da evapotranspiração potencial (ET<sub>0</sub>) no período avaliado. O ano de 2012 foi extremamente seco, com precipitação total anual de 266,80 mm e evapotranspiração potencial acumulada de 2.110,00 mm, o que promoveu elevado

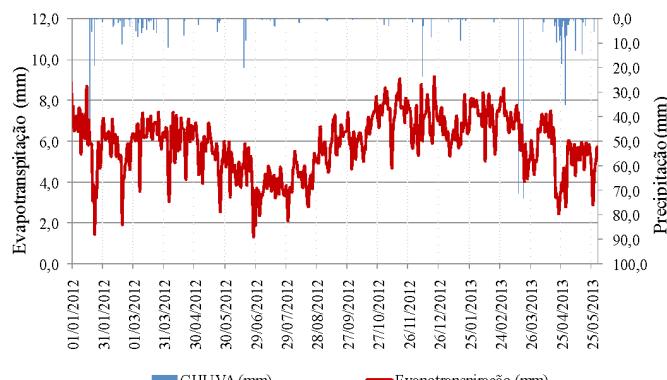


Figura 5. Precipitação e evapotranspiração potencial total diária

déficit hídrico. Conforme Silva et al. (2013), a precipitação média da região é de 671,90 mm. Em 2013, a precipitação acumulada foi de 320,30 mm e a evapotranspiração potencial de 930,60 mm até o dia 31 de maio, enquanto que no ano de 2012 o total para o mesmo período foi de 895,90 mm. O período de maior demanda atmosférica foi de outubro de 2012 a fevereiro de 2013, com evapotranspiração máxima diária de 9,15 mm, ocorrendo no dia 21 de dezembro de 2012.

Ainda na Figura 5 pode-se observar que, apesar da chuva escassa no ano de 2012, houve uma redução da evapotranspiração nos meses de junho e julho, em relação aos demais meses. Tal comportamento deve-se à redução da temperatura, bem como à maior nebulosidade na região para esse período. A temperatura máxima no mês de junho foi de 32,7 °C, a média de 22,8 °C e a mínima de 13,9 °C, enquanto no mês de julho a máxima foi de 30,0 °C, a média de 21,0 °C e a mínima de 12,8 °C.

Em 2013 ocorreram alguns eventos de chuva significativos, que proporcionaram pleno umedecimento do solo, com destaque para dois eventos extremos ocorridos nos dias 14 e 19 de março de 2013, com total precipitado de 71,38 e 73,15 mm, respectivamente. Observou-se uma similaridade no início e término dos eventos, bem como no total precipitado. Tal comportamento pode estar associado a uma tendência e/ou padrão de chuva da região.

A dinâmica de umidade nas condições de solo descoberto e com cobertura natural para o período de 01 de janeiro de 2012 a 31 de maio de 2013, pode ser visto na Figura 6. Existe falha de registro, em função de problemas técnicos do equipamento, no período de 15 de março a 06 de junho de 2012. Pode-se observar comportamento similar da umidade para ambas às condições de cobertura do solo.

A condição de cobertura natural apresentou valores de umidade levemente superiores à condição de solo descoberto na maior parte do período, com exceção em alguns curtos períodos, que possivelmente estão associados aos processos de interceptação e evapotranspiração da vegetação natural e/ou espontânea. Santos et al. (2011) investigaram a variabilidade temporal do conteúdo superficial da água no solo sob diferentes tipos de cobertura superficial do solo, através da reflectometria no domínio do tempo (TDR) e evidenciaram que, após nove dias sem chuva, a parcela com cobertura natural foi a que apresentou maior redução da umidade do solo em relação as demais coberturas (solo descoberto, barramento em pedra e palma forrageira), evidenciando o efeito da evapotranspiração real, uma vez que esta condição de superfície do solo possuía a maior densidade de cobertura vegetal; porém ao longo do tempo, a parcela descoberta foi a que apresentou o menor teor de umidade.

Na Figura 6 observa-se que os menores níveis de umidade no solo ocorreram no final de agosto até início de dezembro de 2012, na condição do solo descoberto. De acordo com Santos et al. (2011), a condição de solo descoberto possui menor rugosidade hidráulica do fluxo superficial, com consequente geração de escoamento superficial e menor infiltração de água no solo.

### Calibração e ajuste do modelo

Quanto aos valores diários medidos e simulados da umidade do solo, para a condição de cobertura natural (Figura 7A) e solo

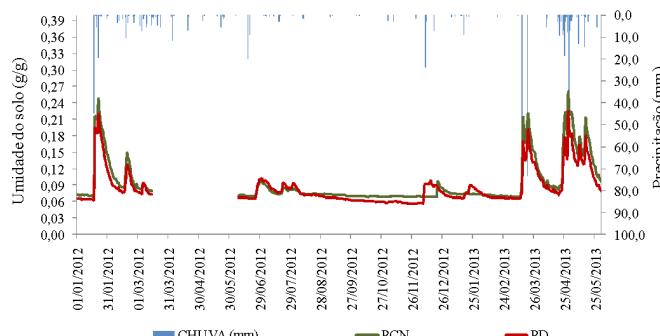


Figura 6. Dinâmica de umidade da parcela com cobertura natural (PCN) e solo descoberto (PD) medidas pela TDR

descoberto (Figura 7B) no ano de 2012, respectivamente, pode-se observar que os valores apresentaram a mesma tendência ao longo do tempo. O modelo não respondeu para alguns eventos, e não conseguiu simular os picos subsequentes para ambos os tratamentos, porém os resultados foram satisfatórios para o período analisado, conforme os índices adotados.

Gonçalves et al. (2007) utilizaram o modelo HYDRUS-1D para modelar a dinâmica da água e sais em monólitos irrigados com águas de diferentes qualidades, e observaram que o modelo conseguiu prever com sucesso o teor de água no solo ao longo de 4 anos avaliados. Kanzari et al. (2012) caracterizaram o movimento da água através da utilização de sondas TDR instaladas em até 4 m em profundidade, e

utilizaram o Hydrus-1D para modelar o movimento de água em uma região semiárida da Tunísia, e verificaram que os dados simulados apresentaram a mesma tendência que os dados medidos.

Zeng et al. (2014) analisaram e modelaram a lixiviação dos sais do solo sob diferentes regimes de irrigação em um Distrito de Irrigação da Mongólia, na China, e observaram que o modelo Hydrus-1D simulou com precisão a dinâmica da água ao longo do perfil do solo. Tal resultado difere do encontrado por Elmi et al. (2012), que investigaram a distribuição vertical de água em uma coluna de solo utilizando o Hydrus-1D, e observaram que os valores estimados de umidade do solo não corresponderam aos valores medidos. Conforme os autores, tal resultado pode estar associado a heterogeneidades no perfil de solo, que não foram consideradas na discretização do modelo. Ainda segundo os autores o solo utilizado no experimento apresenta heterogeneidade textural, e outro fator que contribuiu certamente foi o transporte lateral e os caminhos de fluxos preferenciais.

Quanto as correlações entre os valores medidos e simulados para condições de cobertura natural e solo descoberto no ano de 2012, respectivamente, observa-se na Figura 8, que os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) encontrados indicam que 81,62 e 85,63% dos valores simulados aproximam-se e/ou assemelham-se aos valores medidos para condição de cobertura natural e solo descoberto, respectivamente. Pode-se

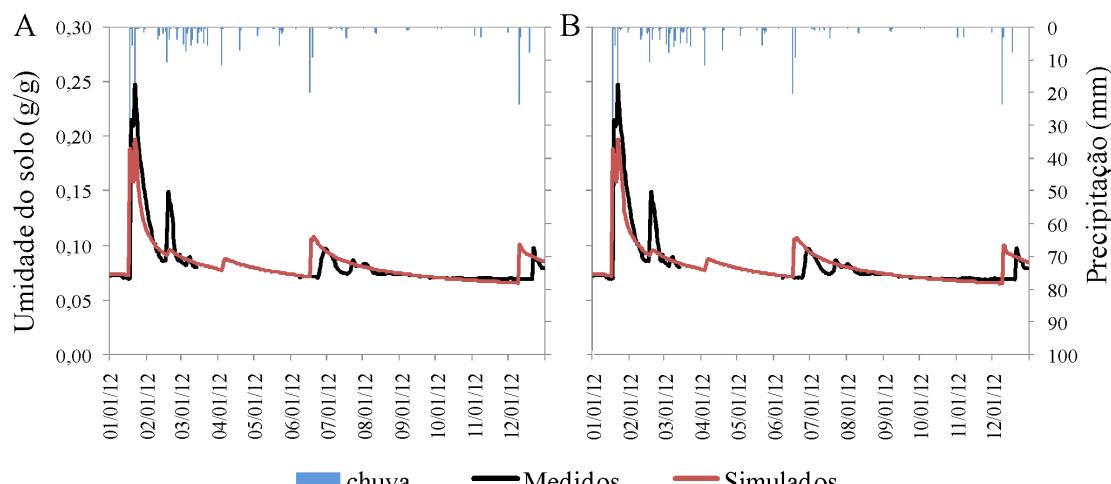


Figura 7. Comparação entre os valores de umidade medidos e simulados no ano de 2012 na profundidade de 20 cm; (A) Parcela de Cobertura Natural e (B) Parcela Descoberta

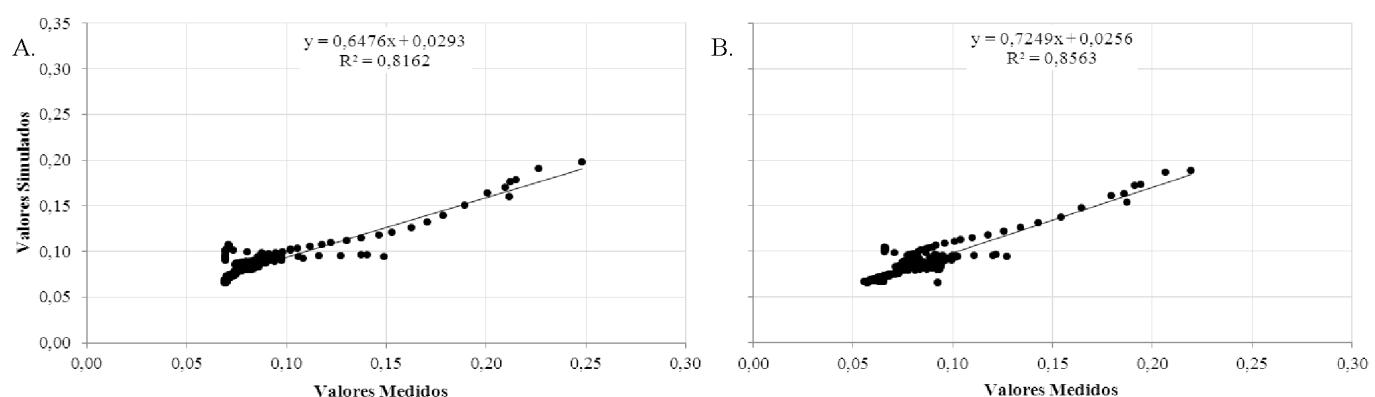


Figura 8. Correlação entre os valores de umidade medidos e simulados para o ano de 2012; (A) Parcela com Cobertura Natural e (B) Parcela Descoberta

observar alta correlação entre os valores. O resultado corrobora com o encontrado por Kanzari et al. (2012), que utilizaram o Hydrus-1D para modelar o movimento de água em uma região semiárida da Tunísia, e encontraram forte correlação entre os valores de umidade do solo medidos e estimados.

### Validação e avaliação de desempenho do modelo

O modelo foi validado com os dados do ano de 2013. Para validação utilizou-se os parâmetros de ajuste e calibração do ano de 2012 ( $\theta_r = 0,028 \text{ cm cm}^{-1}$ ;  $\theta_s = 0,38 \text{ cm.cm}^{-1}$ ;  $\alpha = 0,028$ ;  $n = 1,489$ ;  $I = 0,5$ ;  $K_s = 180 \text{ cm dia}^{-1}$  para solos descoberto e  $K_s = 200 \text{ cm dia}^{-1}$  para cobertura natural, Tabela 4).

Nos valores diários medidos e simulados da umidade do solo para a condição de cobertura natural e solo descoberto no ano de 2013, respectivamente, verifica-se comportamento similar entre os valores simulados e os medidos. Observa-se na Figura 9A que a umidade simulada acompanhou o comportamento da medida, com exceção do período de 21 de março a 20 de abril de 2013, em que a umidade simulada superestimou a umidade medida. Tal comportamento possivelmente está associado aos processos de interceptação e evapotranspiração, porém pode-se observar que o modelo respondeu sensivelmente aos picos de umidade em resposta os eventos de chuva. Considera-se que os resultados foram satisfatórios, uma vez que a simulação envolvendo vegetação natural é mais complexa em função dos processos hidrológicos e dinâmica da vegetação, tal como: sazonalidade da vegetação, (o que implica em diferentes taxas de interceptação e extração de água ao longo do tempo), padrão de chuva, taxa de infiltração do solo e evapotranspiração. Na Figura 9B pode-se observar que a umidade da parcela com solo descoberto também apresentou comportamento similar entre os valores medidos e observados. Os valores simulados subestimaram os medidos no período de 5 a 31 de maio de 2013, consequentemente o modelo considerou uma taxa de escoamento superior a que realmente ocorreu em função da umidade anterior.

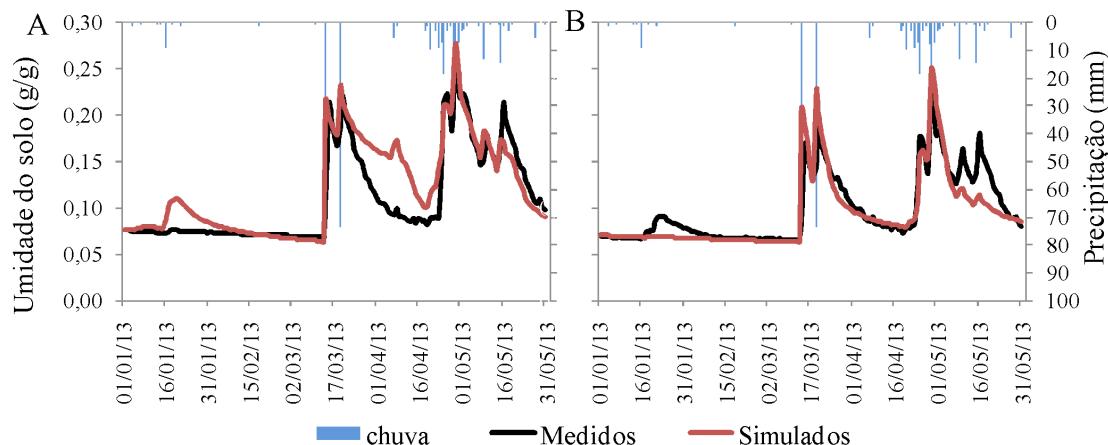
Analizando as diferentes coberturas de solo, pode-se verificar que o modelo simulou a recessão da umidade no período de 21 de março a 20 de abril de 2013 na parcela com solo descoberto, diferindo do comportamento observado na parcela com cobertura natural. Tal comportamento pode estar associado aos processos hidrológicos envolvidos. Os resultados

apontam para a necessidade de quantificar experimentalmente os processos hidrológicos e biofísicos (interceptação, escoamento superficial, infiltração, índice de vegetação, saldo de radiação, temperatura da superfície do solo, evaporação e evapotranspiração real), a fim de garantir melhores ajustes, calibração e validação do modelo para diferentes usos do solo, principalmente nos períodos de transição seco-úmido e no período úmido, uma vez que, nesses períodos o modelo pode apresentar deficiência na sua capacidade de predição. Tais limitações são função da complexidade do processo de distribuição de água no solo, da distribuição da chuva e da interação entre os processos solo-água-planta-atmosfera, sendo necessário um maior refinamento dos parâmetros de entrada para fins de ajuste do modelo.

Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre os valores medidos e simulados para condições de cobertura natural e solo descoberto no ano de 2013, respectivamente, encontrados indicam que 79,29 e 78,54% dos valores simulados aproximam-se e/ou assemelham-se aos valores medidos para condição de cobertura natural (Figura 10A) e solo descoberto (Figura 10B), respectivamente. Observou-se uma pequena redução do coeficiente de 81,62% (ano de 2012-calibração dos dados) para 79,29% (ano de 2013-validação dos dados) para a parcela de cobertura natural (Figura 10A). A redução de 2,33% está possivelmente associada à taxa de interceptação e evapotranspiração, uma vez que a densidade de cobertura vegetal do solo no ano de 2012 foi inferior à de 2013, por conta da escassez de chuva no referido ano.

Para a parcela de solo descoberto (Figura 10B), a redução foi de 85,63 para 78,54%. Tal redução do coeficiente ocorreu em função de dois eventos de chuva nos dias 14 e 19 de março de 2013, onde os dados preditos pelo modelo superestimaram os medidos. A superestimação dos dados indica que o modelo considerou que o volume infiltrado superou o que realmente infiltrou, ou seja, a superestimativa está associada à repartição da chuva em relação aos outros processos envolvidos (infiltração, escoamento superficial e evaporação do solo), mesmo realizando a quantificação do escoamento superficial dos eventos ocorridos.

Os dados de umidade do solo apresentaram maior dispersão no ano de 2013. Tal comportamento possivelmente está associado à maior variabilidade da precipitação, com



**Figura 9.** Comparação entre os valores de umidade medidos e simulados no ano de 2013 na profundidade de 20 cm; (A) Parcela de Cobertura Natural e (B) Parcela Descoberta

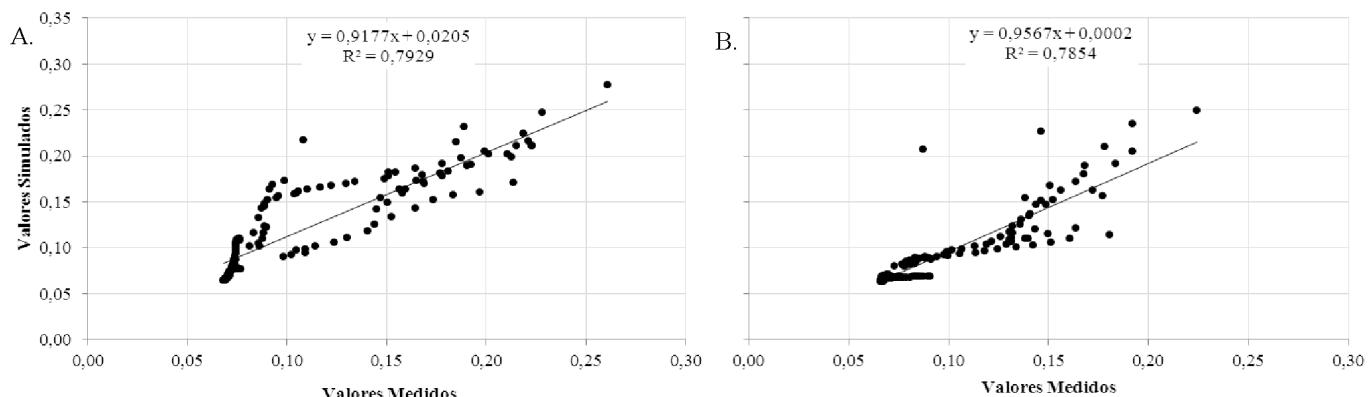


Figura 10. Correlação entre os valores de umidade medidos e simulados para o ano de 2013; (A) Parcela com Cobertura Natural e (B) Parcela Descoberta

má distribuição da chuva e ocorrência de eventos extremos, bem como da dinâmica da vegetação, radiação incidente e temperatura do solo, resultando maior gradiente de umedecimento e secamento do solo, com consequente dispersão dos dados em função das condições biofísicas antecedentes ao monitoramento. Montenegro et al. (2013), em experimentação e modelagem do avanço de sais no perfil do solo em área cultivada com repolho sob alternativas de manejo de irrigação, no semiárido de Pernambuco, verificaram que o desempenho do processo de calibração foi altamente influenciado pela umidade antecedente.

Pode-se verificar que o modelo Hydrus-1D mostrou-se preciso para variável avaliada em conformidade com os índices de avaliação de desempenho aplicados (Tabela 6). Monteiro et al. (2009) utilizaram o Hydrus para investigar o efeito de lâminas de lixiviação e da precipitação no controle da salinidade do solo em lisímetros de drenagem, e verificaram que, na profundidade de 20 cm, onde se situa a maior parte da zona de raízes, o modelo apresentou consistência entre os valores de tensão medidos e simulados. Zeng et al. (2014) encontraram boa concordância entre os valores de umidade do solo medidos e simulados utilizando o HYDRUS-1D, e eficiência da modelagem de Nash-Sutcliffe variando de 0,4865 a 0,9180. Kanzari et al. (2012) observaram que o modelo Hydrus-1D foi capaz de simular a dinâmica de água, com baixos valores de Erro Quadrático Médio (RMSE).

Turnbull et al. (2010) avaliaram e modelaram os processos hidrológicos, a erosão e o transporte de nutrientes em área de transição de pastagem e mata em região semiárida dos Estados Unidos, e verificaram que o modelo apresentou bom desempenho com eficiência de Nash-Sutcliffe igual e/ou superior a 0,65. Montenegro & Ragab (2009) avaliaram e modelaram a resposta hidrológica de uma bacia do semiárido brasileiro sob diferentes usos da terra e cenários de mudanças climáticas, e encontram um coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) igual a 0,73 para a vazão simulada, e um coeficiente de

correlação de 0,70 para os valores simulados e observados para o índice de umidade do solo.

A validação dos dados apresentou correlação e índices satisfatórios. Os resultados encontrados permitem concluir que é possível utilizar o modelo Hydrus-1D para estimativa da umidade do solo em escala diária para o tipo de solo e condições de cobertura investigadas. A eficiência do modelo (NS) variou de 72 a 82%, com RMSE máximo de 3% e concordância superior a 90%. Apesar dos resultados terem sido satisfatórios, vale ressaltar que é necessário ampliar a série de estudo e avaliar o comportamento do modelo em anos mais chuvosos. Por se tratar de um modelo biofísico, a calibração e validação do modelo Hydrus-1D possibilitou adequada quantificação e entendimento dos processos de secamento e umedecimento do solo, especialmente para o período mais seco.

## Conclusões

O modelo Hydrus-1D foi capaz de simular de forma satisfatória a dinâmica de umidade no solo ao longo do tempo para as condições de cobertura natural e solo descoberto na profundidade de 20 cm.

As principais incertezas nas simulações com o modelo Hydrus foram observadas na parcela com vegetação natural e na fase de recessão, após a ocorrência de chuvas intensas, devido à sazonalidade dos parâmetros biofísicos da caatinga.

A eficiência do modelo Hydrus variou de 72 a 82%, com RMSE máximo de 3% e concordância superior a 90%.

A partir da modelagem numérica e dos padrões de chuva ocorridos, verificou-se que a cobertura de caatinga interceptou cerca de 15% da precipitação total.

## Literatura Citada

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, Irrigation and drainage, Paper 56, 1998. 300p. <<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>>. 25 Nov. 2014.
- Araújo, E. C. B. de; Aguiar, A. V. de; Costa, R. N. T. Calibração de um modelo de umidade para um solo aluvial sem cobertura vegetal. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.5, n.3, p.444-449, 2001. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662001000300013>>

Tabela 6. Índices de avaliação do desempenho do modelo Hydrus-1D

Ano	Tratamento	RMSE	d	NS
2012	PCN	0,01	0,93	0,79
	PD	0,01	0,94	0,82
2013	PCN	0,03	0,93	0,72
	PD	0,02	0,94	0,74

PCN- Parcela com Cobertura Natural; PD- Parcela Descoberta; RMSE- Erro Quadrático Médio; d- Coeficiente de Concordância; NS- Eficiência de modelagem Nash-Sutcliffe

- Ávila, L. F.; Mello, C. R. de; Silva, A. M. da. Continuidade e distribuição espacial da umidade do solo em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.12, p.1257-1266, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010001200002>>
- Bezerra, J. M.; Moura, G. B. A.; Silva, B. B. da; Lopes, P. M. O.; Silva, E. F. F. Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do Estado do Rio Grande do Norte, Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, n.1, p.73-84, 2014. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662014000100010>>.
- Bizari, D. R.; Matsura, E. E.; Souza, C. F.; Roque, M. W. Haste portátil para utilização de sondas de TDR em ensaios de campo. *Revista Irriga*, v.16, n.1, p.31-41, 2011. <<http://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/189>>. 20 Ago. 2013.
- Chaves, H. M. L. Sensibilidade do modelo Hydrus aos parâmetros hidráulicos do Solo em diferentes texturas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.14, n.2, p.33-37, 2009. <[http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/462f6678cf5bf04f7badb41fab0bf8a\\_a2ee37b2b8d2c1a5cffc264d76082dfb.pdf](http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/462f6678cf5bf04f7badb41fab0bf8a_a2ee37b2b8d2c1a5cffc264d76082dfb.pdf)>. 20 Ago. 2013.
- Elaiuy, M. L. C.; Sato, L. M.; Varallo, A. C. T.; Souza, C. F. Desenvolvimento e avaliação de sonda TDR para o manejo racional de água em substratos utilizados na produção de mudas florestais. *Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v.4, n.1, 2009. <<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.77>>.
- Elmi, A.; Nohra, J. S. A.; Madramootoo, C. A.; Hendershot, W. Estimating phosphorus leachability in reconstructed soil columns using HYDRUS-1D model. *Environmental Earth Sciences*, v.65, n.6, p.1751-1758, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1007/s12665-011-1154-1>>.
- Entin, J. K.; Robock, A.; Vinnikov, K. Y.; Hollinger, S. E.; Liu, S.; Namkhai, A. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. *Journal of Geophysical Research*, v.105, n.D9, p.11865-11877, 2000. <<http://dx.doi.org/10.1029/2000JD900051>>.
- Gonçalves, M. C.; Ramos, T. B.; Simůnek, J.; Neves, M. J.; Martins, J. C.; Pires, F. P.; Leitão, P. Modelação da dinâmica da água e dos sais num Aluviossolo regado com águas de diferente qualidade: ensaio de validação do modelo HYDRUS-1D com observações em monólitos. *Revista de Ciências Agrárias*, v.30, n.2, 2007. <<http://www.scielo.gpeari.mctes.pt/pdf/rca/v30n2/v30n2a03.pdf>>. 20 Ago. 2013.
- Izídio, N. S. C.; Palácio, H. A. Q.; Andrade, E. M. de; Araújo Neto, J. R.; Batista, A. A. Interceptação da chuva pela vegetação da caatinga em microbacia no semiárido cearense. *RevistaAgro@mbiente On-line*, v.7, n.1, p.44-52, 2013. <<http://revista.ufrr.br/index.php/agroambiente/article/view/977>>. 20 Ago. 2013.
- Kanzari, S.; Hachicha, M.; Bouhlila, R.; Battle-Sales, J. Characterization and modeling of water movement and salts transfer in a semi-arid region of Tunísia (BouHajla, Kairouan) - Salinization risk of soils and aquifers. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.86, p.34-42, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2011.09.010>>.
- Lei, Y.; Lubo, G.; Huaxing, B.; Qingke, Z.; Xiaoyan, W. Spatio-temporal dynamics of soil moisture in silvopastoral system in the Loess Plateau of west Shanxi province. *Procedia Environmental Sciences*, v.8, p.153-160, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2011.10.025>>.
- Lopes, H. L.; Accioly, L. J. O.; Sobral, M. C. M.; Araújo Filho, J. D. de; Candeias, A. L. B. Espacialização da umidade do solo por meio a temperatura da superfície e índice de vegetação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.9, p.973-980, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011000900014>>.
- Monteiro, A. L. N.; Montenegro, A. A. A.; Montenegro, S. M. G. L.; Santos, F. X. dos. Avaliação de lavagem parcial de sais em Neossolo Flúvico irrigado, utilizando modelagem computacional. *Revista de Engenharia Agrícola*, v.29, n.2, p.207-220, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162009000200004>>.
- Montenegro, A. A. A.; Ragab, R. Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: a modelling study. *Hydrological Processes*, v.24, n.19, p.2705-2723, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7825>>.
- Montenegro, S. G. L.; Silva Junior, J. G.; Montenegro, A. A. A.; Carvalho, J. F. de; Albuquerque Filho, J. A. C. Experimentação e modelagem do avanço de sais no perfil do solo em área cultivada com repolho sob alternativas de manejo de irrigação, no semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.8, n.1, p.148-155, 2013. <<http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v8i1a1391>>.
- Montenegro, S. M. G. L.; Montenegro, A. A. A. Aproveitamento sustentável de aquíferos aluviais no semiárido. In: Cabral, J. J. S.; Ferreira, J. P. C. L.; Montenegro, S. M. G. L.; Costa, W. (Eds.). *Água subterrânea: aquíferos costeiros e aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento*. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2004, cap.2, v.1, p.61-117.
- Mualem, Y. A. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, v.12, n.3, p.2187-2193, 1976. <<http://dx.doi.org/10.1029/WR012i003p00513>>.
- Rivera, R. N. C.; Miranda, J. H.; Duarte, S. N.; Botrel, T. A. Modelo aplicado à dinâmica da água e do potássio no solo sob irrigação por gotejamento - análise de sensibilidade. *Revista de Engenharia Agrícola*, v.28, n.3, p.448-459, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162008000300006>>.
- Santos, A. M.; Galvâncio, J. D. Mudanças climáticas e cenários de susceptibilidade ambiental à desertificação em municípios do Estado de Pernambuco. *Revista Eletrônica de Geografia*, v.5, n.13, p.66-83, 2013. <<http://www.observatorium.ig.ufu.br/pdfs/5edicao/n13/04.pdf>>. 04 Dez. 2014.
- Santos, T. E. M. dos; Montenegro, A. A. A.; Silva, D. D. Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.7, p.670-679, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011000700004>>.
- Silva, A. P. N. da; Montenegro, A. A. A.; Moura, G. B. A.; Silva, J. J. N.; Souza, L. R. de. Chuva mensal provável para o Agreste de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.8, n.2, p.287-296, 2013. <<http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v8i2a1444>>.

- Silva, J. R. L. da; Montenegro, A. A. A.; Santos, T. E. M. dos. Caracterização física e hidráulica de solos em bacias experimentais do semiárido brasileiro, sob manejo conservacionista. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.1, p.27-36, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000100004>>.
- Šimůnek, J.; Šejna, M.; Saito, M. H.; Sakai, M.; van Genuchten, M. T. The HYDRUS-1D Software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated Media. Version 4.08. Riverside, USA: University of California, Department of Environmental Sciences, 2009. 332p. <[http://www.pc-progress.com/Downloads/Pgm\\_hydrus1D/HYDRUS1D-4.08.pdf](http://www.pc-progress.com/Downloads/Pgm_hydrus1D/HYDRUS1D-4.08.pdf)>. 20 Ago. 2013.
- Turnbull, L.; Wainwright, J.; Brazier, R.E. Hydrology, erosion and nutrient transfers over a transition from semi-arid grassland to shrubland in the South-Western USA: A modelling assessment. *Journal of Hydrology*, v.388, n.3-4, p.258-272, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.005>>.
- van Genuchten, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*, v.44, n.5, p.892-898, 1980. <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>>.
- Vanclooster, M.; Viane, P.; Diels, J.; Christiaens, K. WAVE: A mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment. Reference and User's Manual (release 2.0). Louvain-la-Neuve: Universite Catholique de Louvain; Institute for Land and Water Management, 1994. 145p.
- Zeng, W.; Xu, C.; Wu, J.; Huang, J. Soil salt leaching under different irrigation regimes: HYDRUS-1D modelling and analysis. *Journal of Arid Land*, v.6, n.1, p.44-58, 2014. <<http://dx.doi.org/10.1007/s40333-013-0176-9>>.
- Zeng, Y.; Feng, Z.; Xiang, N. Assessment of soil moisture using Landsat ETM+ temperature/vegetation index in semiarid environment. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, v.6, p.4036-4039, 2004. <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1370089>>. 04 Dez. 2014.