

## DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA E POTÁSSIO EM SOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR SOB GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL PELO MODELO HYDRUS-2D

KATARINA LIRA GRECCO<sup>1</sup>, JARBAS HONORIO DE MIRANDA<sup>2</sup>, LAÍS KARINA SILVEIRA<sup>3</sup>, EMILY AQUINO LEITE<sup>4</sup>, MARTINUS TH. VAN GENUCHTEN<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Doutora em Ciências, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (USP/ESALQ), (19) 992330596, klgrecco@usp.br;

<sup>2</sup> Professor Doutor Associado 2, USP/ESALQ, jhmirand@usp.br;

<sup>3</sup> Mestranda em Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), lais.k.silveira@gmail.com;

<sup>4</sup> Graduanda em Engenharia Agrônoma, USP/ESALQ, emily.leitee@usp.br;

<sup>5</sup> Professor Doutor Colaborador, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), rvangenuchten@hotmail.com.

Apresentado no  
XLVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2019  
17 a 19 de setembro de 2019 - Campinas - SP, Brasil

**RESUMO:** O dimensionamento correto de sistemas de irrigação por gotejamento é essencial para um uso racional dos recursos hídricos. Porém, as investigações em condições de campo exigem tempo e recursos financeiros e nesse sentido, os modelos numéricos podem auxiliar em fornecer várias informações sobre as distribuições esperadas de água e soluto no perfil do solo. Portanto, o objetivo desse estudo foi aplicar o modelo HYDRUS-2D para simulações da dinâmica da água e potássio em recipientes preenchidos com solo irrigado por gotejamento subsuperficial e cultivado com cana-de-açúcar. Ao final, comparar os dados simulados e observados por parâmetros estatísticos. As investigações foram realizadas em casa de vegetação durante 240 dias após a fase de perfilhamento. As distribuições espaciais e temporais do conteúdo de água e concentrações de potássio foram coletadas utilizando a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), as quais foram utilizadas para calibrar e validar o modelo HYDRUS-2D. Os valores dos parâmetros estatísticos indicaram uma capacidade favorável do modelo para simular o conteúdo de água no solo. Para as concentrações de potássio, um desempenho inferior ao ótimo foi obtido com o HYDRUS-2D. A melhoria nas simulações requer um melhor entendimento e medição dos parâmetros de absorção de soluto e a evolução das distribuições das raízes das culturas.

**PALAVRAS-CHAVE:** cana-de-açúcar; gotejamento subsuperficial; HYDRUS-2D.

### HYDRUS-2D SIMULATIONS OF WATER AND POTASSIUM DISTRIBUTIONS IN A SUBSURFACE DRIP-IRRIGATED SOIL CULTIVATED WITH SUGARCANE

**ABSTRACT:** Correct design of drip irrigation systems is essential for a rational use of water resources. However, field investigations demand time and financial resources, and in this sense, numerical models can also provide much information on the expected water and solute distributions in the soil profile. Therefore, the objective of this study was to apply the HYDRUS-2D model for simulations of water and potassium dynamics in in containers packed with a subsurface drip-irrigated soil cultivated with sugarcane. At the end, to compare simulated and observed data through statistical parameters. Investigations were carried out in a greenhouse for 240 days after the tillering stage. Spatial and temporal distributions of water content and potassium concentrations were collected using Time Domain Reflectometry (TDR), to calibrate and validate the HYDRUS-2D results. The values of the statistical parameters indicated a favorable capacity of the model to simulate the soil water content. For the potassium concentrations, a less than optimal performance was obtained with HYDRUS-2D. Improved simulations require a better understanding and measurement of solute uptake parameters and evolving crop root distributions.

**KEYWORDS:** HYDRUS-2D; subsurface drip; sugarcane.

**INTRODUÇÃO:** O uso racional de recursos naturais, evitando ou limitando os impactos ambientais devido à má gestão, requer um conhecimento profundo dos processos de transporte de água e soluto em perfis de solo irrigado. A Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) possui muitas vantagens no

monitoramento de processos de transporte de água e soluto, como precisão, uso de múltiplas leituras, repetição sem destruição do solo e segurança. No entanto, as investigações de campo com o TDR são frequentemente demoradas e dispendiosas, como alternativa os modelos numéricos podem fornecer informações adicionais sobre os processos predominantes na subsuperfície. O modelo HYDRUS-2D, em particular, tem sido utilizado em muitos estudos de irrigação por gotejamento e/ou fertirrigação. O objetivo deste estudo foi utilizar o HYDRUS-2D para simulações de dinâmica de água e potássio em recipientes cultivados com cana-de-açúcar e irrigado por gotejamento subsuperficial, e comparar dados simulados e observados através de parâmetros estatísticos.

**MATERIAL E MÉTODOS:** O experimento foi conduzido a partir da fase de perfilamento no período de junho/2015 a janeiro/2016 em casa de vegetação na área experimental da USP/ESALQ (22 ° 43' 33"S, 47 ° 38' 00"W, altitude de 547 m). Foram preenchidos três recipientes de polietileno (120 cm de diâmetro, 60 cm de altura e 500 L) de maneira uniforme e acondicionados com Latossolo Vermelho-Amarelo, cujo material foi coletado na profundidade de 0-30 cm. A partir do fundo dos recipientes, utilizou-se cinco camadas de 10 cm, sendo que a camada inferior foi preenchida por brita coberta por uma manta geotêxtil para evitar perdas de solo pelo dreno. Posteriormente, quatro camadas foram preenchidas em cada recipiente. Um gotejador foi instalado por recipiente a uma profundidade de 25 cm, com vazão igual a 4,0 L h<sup>-1</sup>. O plantio da de cana-de-açúcar (RB92579) foi realizado mediante mudas com 30 dias. Um total de dezesseis sondas de TDR foram instaladas em quatro camadas de 10 cm e em um lado dos recipientes, devido à ocorrência de simetria das medidas do volume do solo molhado (KANDELOUS et al., 2011). O monitoramento do conteúdo de água no solo foi realizado com a técnica de TDR e uma curva de calibração desenvolvida por Ponciano et al. (2015):

$$\theta = 2.6953.10^{-5}K_a^3 - 0.0016K_a^2 + 0.0395K_a - 0.014 \quad (1)$$

em que:  $\theta$  é o conteúdo de água no solo (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) e  $K_a$  é a constante dielétrica aparente (adimensional) obtida pela TDR. A determinação das concentrações de potássio no perfil de solo foi feita também pela técnica da TDR com as seguintes curvas de calibração:

$$CE_s = 1.9790CE_{TDR} - 0.0630\theta + 0.0391 \quad (2)$$

$$C_{KNO_3} = 0.8699CE_s - 0.0634 \quad (3)$$

$$C_{K^+} = 0.3760C_{KNO_3} + 0.0281 \quad (4)$$

em que:  $CE_s$  é a condutividade elétrica da solução (dS m<sup>-1</sup>),  $CE_{TDR}$  é a condutividade elétrica estimada pela TDR (dS m<sup>-1</sup>),  $C_{KNO_3}$  é a concentração de nitrato de potássio na solução (mg cm<sup>-3</sup>) e  $C_{K^+}$  é a concentração de potássio na solução (mg cm<sup>-3</sup>). O processo de irrigação por gotejamento subsuperficial foi modelado utilizando-se o modelo HYDRUS-2D (ŠIMŮNEK; ŠEJNA; VAN GENUCHTEN, 1999) baseado na seguinte forma da equação de Richards:

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ rK(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \right] - S(h) \quad (5)$$

em que:  $h$  é o potencial mátrico (cm),  $t$  é o tempo (dia),  $r$  é a coordenada radial (cm),  $z$  é a coordenada vertical (cm),  $K$  é a condutividade hidráulica (cm dia<sup>-1</sup>) e  $S$  é a absorção de água pelo sistema radicular (dia<sup>-1</sup>). As simulações do transporte de potássio foram realizadas usando a equação tridimensional de dispersão-advectação dada por:

$$\frac{\partial \theta RC}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \theta D_{rr} \frac{\partial C}{\partial r} + \theta D_{rz} \frac{\partial C}{\partial z} - q_r C \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \theta D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} + \theta D_{rz} \frac{\partial C}{\partial z} - q_z C \right] - S(h)C_s \quad (6)$$

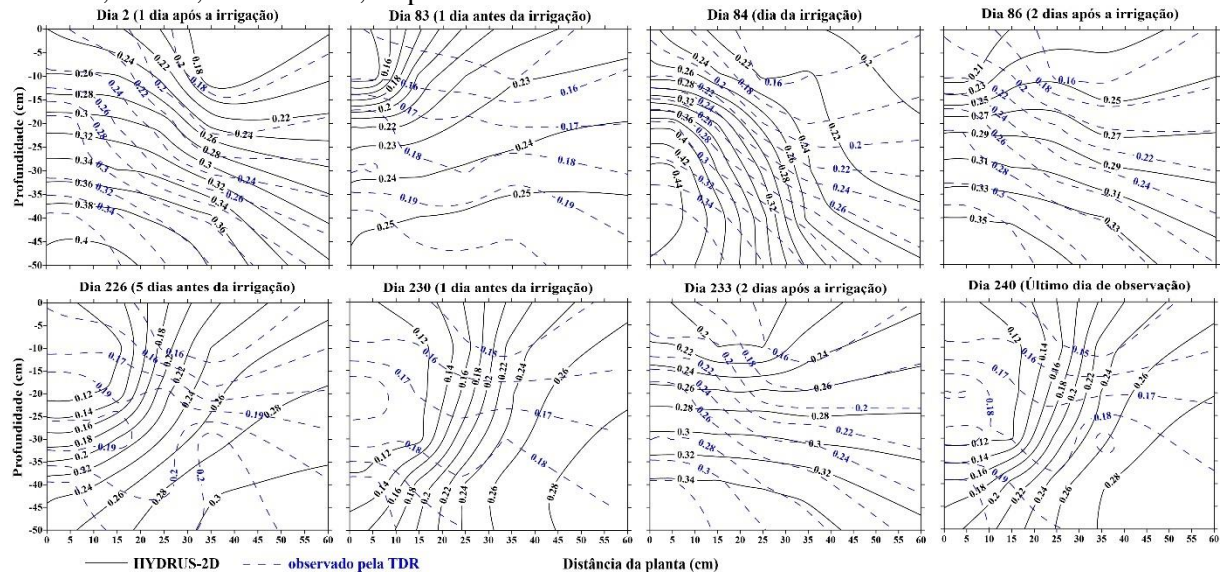
em que:  $C$  é a concentração da solução (mg cm<sup>-3</sup>),  $C_s$  é a concentração do soluto retirada pela captação da água pelas raízes (mg cm<sup>-3</sup>),  $R$  é o fator de retardamento (adimensional),  $q_r$  e  $q_z$  são os fluidos dos fluxos volumétricos radial e vertical (cm dia<sup>-1</sup>), respectivamente, e  $D_{rr}$ ,  $D_{rz}$  e  $D_{zz}$  são componentes do tensor de dispersão (cm<sup>2</sup> dia<sup>-1</sup>). O desempenho do modelo para prever o conteúdo de água no solo e as concentrações de potássio foram avaliados em termos do Erro Quadrático Médio da Raiz (RMSE) e do Erro Absoluto Médio (MAE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |a_i - b_i|}{n} \quad (8)$$

em que: onde  $a_i$  e  $b_i$  são os dados observados e simulados, respectivamente. O software Surfer foi utilizado para comparar e mapear os dados através do método da krigagem em algumas datas.

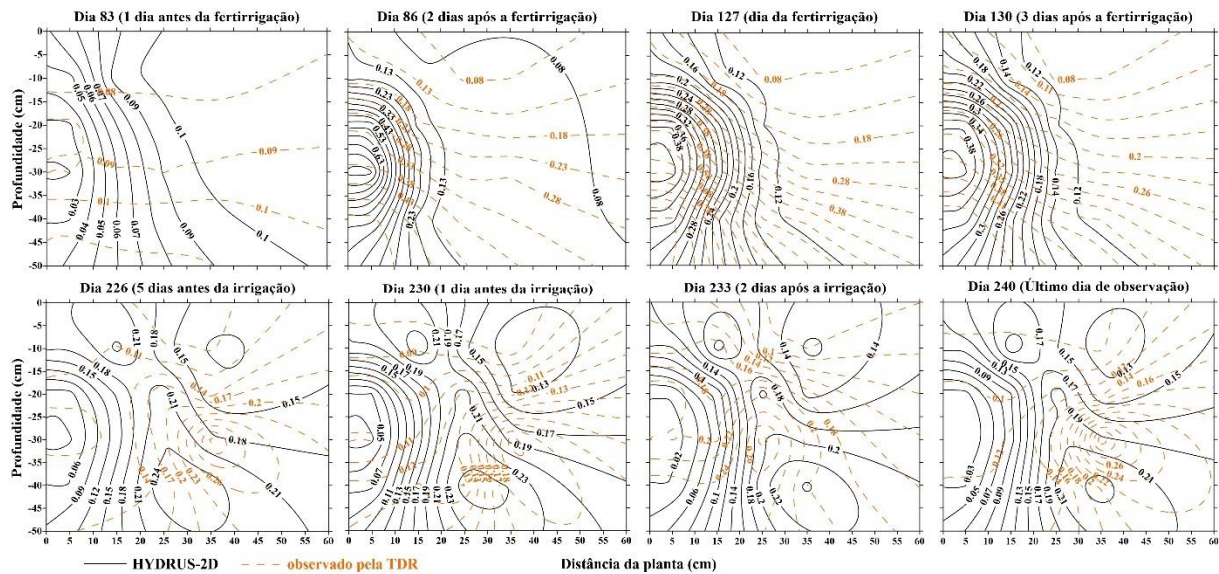
**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Na Figura 1 apresentou as distribuições dos conteúdos de água simulados e observados em diferentes datas durante o ensaio experimental. As isolinhas apresentaram um comportamento similar no dia 2, um dia após a 1ª irrigação. Porém, o modelo superestimou os conteúdos de água no solo, em que o maior valor foi de  $0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  comparado a  $0,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  observado no experimento. Apenas as isolinhas com  $0,18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  estiveram próximas. RMSE e MAE foram  $0,048$  e  $0,043 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , respectivamente.



**Figura 1.** Distribuição espacial do conteúdo de água observado e simulado ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) no perfil do solo em datas indicadas.

No dia 83, um dia antes da 2ª irrigação, as isolinhas observadas apresentaram um comportamento “horizontal” em função da redução do conteúdo de água de forma homogênea do fundo do recipiente para a superfície do solo. O HYDRUS-2D mostrou isolinhas concentradas no lado esquerdo próximo à superfície do solo, com maiores valores de umidade do que os valores observados ao longo do perfil. Essas isolinhas concentradas indicaram onde as raízes foram distribuídas e ocorreu a maior densidade radicular. Os valores de RMSE e MAE foram  $0,051$  e  $0,050 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , respectivamente. Os maiores valores observados e simulados concentraram-se no lado inferior esquerdo para o dia 84 (dia da irrigação). No entanto, o modelo superestimou todos os conteúdos de água ao longo do perfil do solo. Este foi o pior desempenho em datas selecionadas para mapeamento com RMSE e MAE de  $0,067$  e  $0,062 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , respectivamente. Os dias 86 e 233, dois dias após a irrigação, houve um comportamento semelhante ao dia 84 com RMSE de  $0,051$  e  $0,050 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e MAE de  $0,046$  e  $0,043 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , respectivamente. As isolinhas observadas foram horizontais e as simuladas foram verticais no dia 226, cinco dias antes da irrigação. O modelo subestimou os menores teores de água de  $0,12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e superestimou os valores mais altos de  $0,30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . RMSE e MAE foram  $0,062$  e  $0,056 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , respectivamente. O mesmo comportamento do dia 226 esteve presente nos dias 230 (um dia antes da irrigação) e 240 (último dia observado) com RMSE de  $0,060$  e  $0,059 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , respectivamente, e MAE de  $0,052 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para ambos.

Na Figura 2 exibiu as distribuições da concentração de potássio observada e simulada em diferentes datas. As isolinhas apresentaram comportamento diferenciado no dia 83, um dia antes da 1ª fertirrigação, as isolinhas observadas foram horizontais com a redução das concentrações de potássio de forma homogênea do fundo do recipiente para a superfície do solo. O HYDRUS-2D mostrou isolinhas verticais no lado esquerdo com valores menores. RMSE e MAE foram  $0,037$  e  $0,030 \text{ mg cm}^{-3}$ , respectivamente. No dia 86, o modelo superestimou as concentrações mais altas, e estas estavam no lado esquerdo, perto do gotejador, mas as concentrações observadas estavam no lado inferior esquerdo. Os parâmetros estatísticos (RMSE e MAE) foram  $0,180$  e  $0,135 \text{ mg cm}^{-3}$ , respectivamente. Nos dias 127 e 130, dia de fertirrigação e três dias após a fertirrigação, houve um comportamento semelhante ao dia 86, entretanto, o modelo subestimou todas as concentrações de potássio ao longo do perfil do solo. Além disso, o dia 127 apresenta o pior desempenho nas datas selecionadas com RMSE e MAE de  $0,284$  e  $0,207 \text{ mg cm}^{-3}$ , respectivamente. RMSE e MAE para o dia 130 foram  $0,117$  e  $0,088 \text{ mg cm}^{-3}$ , respectivamente.



**Figura 2.** Distribuição espacial das concentrações de potássio observadas e simuladas ( $\text{mg cm}^{-3}$ ) no perfil do solo em datas indicadas.

Não houve mais fertirrigação para as próximas datas (dias 226, 230, 233 e 240). As maiores concentrações observadas ( $0,32$  a  $0,26 \text{ mg cm}^{-3}$ ) foram na camada de  $25\text{-}40 \text{ cm}$  no dia 226 e as maiores concentrações simuladas ( $0,24$  a  $0,21 \text{ mg cm}^{-3}$ ) na camada de  $20\text{-}50 \text{ cm}$  com RMSE e MAE de  $0,078$  e  $0,063 \text{ mg cm}^{-3}$ , respectivamente. As maiores concentrações de potássio pelo HYDRUS-2D permaneceram na mesma camada para o dia 230, mas com a superestimação dos valores. Neste dia, as maiores concentrações observadas iniciaram-se em  $25 \text{ cm}$  de profundidade com RMSE e MAE de  $0,080$  e  $0,070 \text{ mg cm}^{-3}$ , respectivamente. O modelo subestimou as maiores concentrações no dia 233 e a localização das concentrações a partir de  $35 \text{ cm}$  de profundidade até o recipiente inferior, demonstrando o acúmulo de potássio pela “lavagem” do solo pela água de irrigação. Os valores de RMSE e MAE foram  $0,109$  e  $0,086 \text{ mg cm}^{-3}$ , respectivamente, e as maiores concentrações observadas ( $0,26$  a  $0,22 \text{ mg cm}^{-3}$ ) iniciaram em  $20 \text{ cm}$  de profundidade. Um comportamento semelhante dos dias 230 e 233 esteve presente no dia 240 (último dia observado) com RMSE e MAE de  $0,072$  e  $0,060 \text{ mg cm}^{-3}$ , respectivamente.

**CONCLUSÕES:** O monitoramento do conteúdo de água e concentrações de potássio no solo por meio da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) foi satisfatório através da calibração da técnica. Os parâmetros estatísticos indicaram uma capacidade favorável do modelo HYDRUS-2D em simular o conteúdo de água no solo. Para as concentrações de potássio, notou-se um desempenho abaixo do ideal foi apresentado pelo modelo. Um melhor entendimento e determinação precisa dos parâmetros de absorção de potássio e esquematização do sistema radicular espacial e temporal da cultura devem ser necessários para promover melhores simulações pelo modelo.

#### REFERÊNCIAS:

- KANDELOUS, M. M. et al. Soil Water Content Distributions between Two Emitters of a Subsurface Drip Irrigation System. *Soil Science Society of America Journal*, v. 75, n. 2, p. 488, 2011.
- MALAVOLTA, E. *Fertilizing for high yield sugarcane*. Bulletin, ed. Basel: International Potash Institute, 1994.
- PONCIANO, I. M. et al. An empirical model for predicting soil daily evaporations: soil and atmospheric variables. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 9, n. 4, p. 225–231, 2015.
- ŠIMÚNEK, J.; ŠEJNA, 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*, 1999.
- STEDUTO, P. et al. *Crop yield response to water*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.