



Estimativa da Concentração de Sódio na Solução do Solo com Uso de Reflectometria no Domínio do Tempo

E.F.COELHO⁽¹⁾, W.L. SIMÕES⁽²⁾, L.A. A.VEIMROBER JUNIOR⁽³⁾ & D.B. SANTOS⁽⁴⁾

RESUMO - O monitoramento da distribuição de íons no perfil do solo constitui-se em ferramenta essencial em estudos de salinidade. O trabalho objetiva definir um modelo matemático para estimativa do teores de sódio na solução do solo em função da condutividade elétrica aparente e da umidade do solo dadas pela TDR. Um solo de textura argilosa foi inserido em colunas de PVC e submetido a quatro níveis de umidade e sete níveis de solução salina de cloreto de sódio e cloreto de cálcio. Três sondas de TDR foram usadas para leituras de umidade e de condutividade elétrica em todas as colunas com três repetições de leituras por coluna. Em seguida as leituras, um extrator de solução foi instalado na mesma posição em que a sonda fora inserida e a solução do solo foi retirada tendo-se medido a condutividade elétrica e a concentração de sódio da mesma. Um modelo paramétrico empírico de obtenção da condutividade elétrica do solo como função da umidade e condutividade elétrica da solução do solo foi ajustado aos dados e outro modelo linear foi ajustado aos dados de condutividade elétrica da solução do solo e concentração de sódio. A combinação desses modelos foi usada para estimar a concentração de sódio em função da condutividade elétrica e da umidade lidas pela TDR. Concluiu-se que a concentração de sódio na solução do solo pode ser estimada com base na condutividade elétrica da solução do solo por um modelo linear. A concentração de sódio pode, também, ser estimada pelo uso da reflectometria no domínio do tempo, a partir das leituras de umidade e da condutividade elétrica do solo.

Introdução

O monitoramento da distribuição de íons no perfil do solo constitui-se em ferramenta essencial em estudos de salinidade. Isso tem sido feito por meio de amostragens do solo ou por meio de extratores de solução do solo a partir de onde se determina a condutividade elétrica (CE) do solo. O uso de extratores de solução, entretanto não é muito comum e apresenta uma limitação quanto a umidade do solo que deve ser tal que permita o fluxo de solução do mesmo para o interior da cápsula porosa do extrator. Se a umidade do solo corresponder a potenciais próximos de -70 kPa, não haverá fluxo de solução para a cápsula e portanto o uso dos extratores deixará de ser adequado. A amostragem de solo para se obter o extrato de saturação requer trabalho e tempo, pois há necessidade do processamento da amostra que demanda um período de 24 horas. Uma alternativa viável para esse fim, é a reflectometria no domínio do tempo (TDR), que além

de possibilitar o conhecimento simultâneo de umidade (θ) e condutividade elétrica (CEa), em tempo real e de forma contínua, vislumbra a possibilidade de conhecimento da condutividade elétrica da solução do solo (CEw) e da concentração de íons no solo. Nesse sentido, diversos modelos matemáticos têm sido propostos para estimar CEw como função de θ e CEa [2, 6, 7, 11], modificado por Rhoades, Raats, Prather [7]. Há também a chance de viabilizar o uso desses equipamentos para estudos de distribuição de íons, isto é, estimar a concentração de um determinado íon como função da condutividade elétrica aparente (CEa) e a umidade (θ) lidos pela TDR. Tais relações têm sido determinadas por diversos autores [6, 7] e avaliadas por outros tais como MUNOZ-CARPENA, Regalado, Alvarez-Benedi, Socorro & Perez [4]. O trabalho objetiva definir um modelo matemático para estimativa do teores de sódio na solução do solo em função da condutividade elétrica aparente e da umidade do solo dadas pela TDR.

Palavras-Chave: concentração de íons no solo, TDR, condutividade elétrica

Material e métodos

O experimento foi realizado no Laboratório de Irrigação e fertirrigação da Embrapa Mandioca e Fruticultura, a partir de um solo de textura argilosa, com as seguintes características físicas: areia total 590 g kg^{-1} , silte 95 g kg^{-1} , argila 315 g kg^{-1} , densidade do solo de $1,33 \text{ kg dm}^{-3}$, de partículas $2,50 \text{ kg dm}^{-3}$ e porosidade total 46,8%. As amostras deformadas foram destorroadas e secas ao ar, sendo em seguida acondicionadas em colunas de PVC de 0,15 m de altura e 0,10 m de diâmetro. O solo foi acondicionado nas colunas de forma a resultar numa densidade média de $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$. O fundo ou a base de cada coluna de solo foi vedado com uma tela de malha fina. O experimento consistiu de promover no solo sob cinco níveis de umidade (40%, 60%, 80%, 100% e 120% da umidade à capacidade de campo, $0,3342 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) sete níveis de salinidade definidos pela aplicação de soluções de cloreto de sódio e cloreto de cálcio na proporção de 3:2 em peso de condutividades elétricas: água destilada (CE1), 4 dS m^{-1} (CE2), 7 dS m^{-1} (CE3), 10 dS m^{-1} (CE4), 13 dS m^{-1} (CE5), 16 dS m^{-1} (CE6) e 19 dS m^{-1} (CE7). Foram utilizadas 35 colunas de PVC. Após a aplicação do volume necessário para atingir as umidades previstas, deixou-se o solo em repouso por 24 horas com uma cobertura de plástico na superfície do mesmo para evitar evaporação e permitir adequada redistribuição de água na coluna. Em seguida foi feito as leituras de umidade e da condutividade elétrica da solução do solo em cada coluna com uso de um analisador de umidade TDR. Foram usadas três sondas de TDR de

0,10 m de comprimento da haste livre: S1 com distancia entre hastes de 3,0 cm e comprimento de resina de poliester de 4,5 cm; S2 com distancia entre hastes de 2,0 cm e comprimento de resina de poliester de 3,5 e S3 com distancia entre hastes de 2,5 cm e comprimento de resina de poliester de 5,5 cm. Foram feitas três repetições de leituras de umidade e de condutividade elétrica com cada sonda. Após as leituras, retirou-se o solo contido na região das leituras dentro da coluna, no local onde era inserida a sonda e instalou-se ali um extrator de solução, ao qual foi aplicada uma tensão equivalente a 70 kPa com uma bomba de vácuo manual seguido de um período de espera e retirada da solução do solo. Foram feitas as determinações da condutividade elétrica da solução, por meio de um condutivímetro de bancada e das concentrações do íon Na^+ com uso de soluções extratoras de Melich-1 [1].

Os dados da condutividade elétrica aparente (CE_a) corrigida para a temperatura de 25°C e umidade lida na TDR médios das três leituras de cada sonda e das três sondas, juntamente com a condutividade elétrica da solução do solo (CE_w) em cada coluna de solo foram usados nos ajustes do modelo paramétrico empírico proposto por Vogeler, Clothier, Green, Scotter & Tillman [10] para solos agregados, considerado um modelo apropriado para o ajuste [8]:

$$\text{CE}_a = (c\theta - d)\text{CE}_w + (a\theta - b) \quad (1)$$

em que a, b, c e d são constantes cujos valores são obtidos após processo de otimização do ajuste dos dados de CE_a , CE_w e umidade (θ) a equação 1. Os dados de CE_w e concentração de Na^+ foram ajustados a uma função afim do tipo:

$$\text{CE}_w = a'[\text{Na}^+] + b' \quad (2)$$

Substituindo-se (2) em (1) e explicitando-se $[\text{Na}^+]$ obteve-se um modelo relacionando $[\text{Na}^+]$ da solução do solo com CE_a e θ lidos pela TDR:

$$[\text{Na}^+] = \frac{\text{CE}_a - (a\theta + b)}{(c\theta + d) \cdot a' - a'} \quad (3)$$

Os dados de teores de sódio das soluções coletadas nas colunas de solo e a umidade e CE_a estimadas pela TDR foram ajustados ao modelo proposto por otimização, com uso da planilha eletrônica Excel para determinação de a, b, c, d, a' e b'.

A avaliação dos modelos quanto à sua capacidade de estimar a concentração de sódio $[\text{Na}^+]$, a partir de dados de θ e CE_a obtidos com a técnica da TDR, foi feita com base no coeficiente de concordância (D), proposto por Willmott [13] (Equação 4), no coeficiente de determinação (R^2) e no grau de ajuste da variável dependente (Y) com a variável independente (X), mediante o estabelecimento de uma equação do tipo $Y = aX$, após otimização de seus ajustes aos dados medidos, por meio de planilha eletrônica.

$$D = 1 - \frac{\sum (M_i - E_i)^2}{\sum (M_i - \bar{M})^2 + |R_i - \bar{M}|^2} \quad (4)$$

Resultados

A avaliação dos modelos de estimativa de $[\text{Na}^+]$ foi feita considerando os valores das constantes a, b, c e d da equação (1) e os valores a' e b' da equação (2) após ajustes dos dados às mesmas e numa segunda instancia foi feita de forma independente, isto é, usando-se diretamente a equação (3) e fazendo o ajuste dos dados.

Na primeira aproximação, a Tabela 1 mostra os resultados dos parâmetros das equações (1) e (2) após a otimização do ajuste e a equação (3) usando os parâmetros obtidos nesses ajustes.

A segunda aproximação, isto é, partindo-se da equação (3) e fazendo-se o ajuste dos dados de $[\text{Na}^+]$, CE_a e θ , obteve-se após o processo de otimização os seguintes parâmetros:

$$[\text{Na}^+] = \frac{\text{CE}_a - (-1,93744\theta - 0,50806)}{(0,00008\theta - 0,00483) \cdot 1,68097} - 27,2571$$

O R^2 foi de 0,8382 e o coeficiente $D = 0,9981$.

Discussão

Os resultados da primeira aproximação mostram que as condutividades elétricas (CE_a) e as umidades (θ) lidas na TDR podem ser usadas para a estimativa da condutividade elétrica da solução do solo (CE_w) com razoável precisão e que o modelo (equação 1) subestima a CE_a lida na TDR em 2,64%. O R^2 resultante do ajuste dos dados de CE_w e $[\text{Na}^+]$ mostra que ambas as variáveis estão fortemente relacionadas entre si. Os parâmetros resultantes das equações (1) e (2) permitem a estimativa de $[\text{Na}^+]$ a partir da CE_a e θ pela equação (3), onde o modelo superestima a $[\text{Na}^+]$ medida em 1,11%. Esses resultados são compatíveis com os resultados de Munoz-Carpena, Regalado, Alvarez-Benedi, Socorro & Perez [4] que ajustaram o modelo de ROADES et al. (1976) para estimativa da CE_a como função da CE_w e θ para solos franco argiloso e franco arenoso. O ajuste do modelo linear a relação CE_w e $[\text{Na}^+]$ indica que pode-se estimar a concentração do íon com base na CE_w , o que reforça os resultados obtidos por outros autores para outros íons [2, 10, 12].

Na segunda aproximação o modelo subestimou $[\text{Na}^+]$ medido em 3,9%, o que indicou que a equação (3) pode ser diretamente usada para ajuste dos dados sem necessariamente ter que se determinar os parâmetros pelas equações (2) e (3). Esses resultados também reforçam os obtidos por Santana, Coelho,

Silva, Ramos & Coelho Filho [8] que obtiveram ajustes do modelo de Vogeler et al. (1996) adaptado para estimativa da concentração de potássio para as faixas de 0 a 60 e 0 a 120 mg L⁻¹, para solos de textura franca e franco-arenosa, respectivamente.

Conclusões

A concentração de sódio na solução do solo pode ser estimada com base na condutividade elétrica da solução do solo por um modelo linear. A concentração de sódio pode, também, ser estimada pelo uso da reflectometria no domínio do tempo, a partir das leituras de umidade e da condutividade elétrica do solo. O modelo resultante da combinação do de Vogeler, Clothier, Green, Scotter & Tillman [10] que relaciona a condutividade elétrica do solo, a condutividade elétrica da solução do solo e a umidade e um modelo linear que relaciona a condutividade elétrica da solução do solo e a concentração de sódio na solução permitiu estimar a concentração de sódio na solução do solo em função da condutividade elétrica do solo e da umidade lidas na TDR.

- [6] NADLER, A., FRENKEL, H., MANTELL, A. Applicability of the four-probe technique under extremely variable water contents and salinity distribution. *Soil Science Society of America Journal* v.48, p.1258-1261. 1984.
- [7] RHOADES, J.D., RAATS, P.A., PRATHER, R.J. Effects of liquid phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, v.40, p.651-655. 1976
- [8] SANTANA, G.S., COELHO, E.F., SILVA, T.S.M., RAMOS, M.M., COELHO FILHO, M.A. Estimativa da condutividade elétrica aparente do solo em função da umidade e da condutividade elétrica da solução do solo. In XXXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2004a, CD-ROM.
- [9] SANTANA, G.S., COELHO, E.F., SILVA, T.S.M., RAMOS, M.M., COELHO FILHO, M.A. estimativa do teor de potássio na solução do solo a partir da condutividade elétrica da solução do solo. in xxxiii congresso brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2004b, CD-ROM.
- [10] VOGELER, I.; CLOTHIER, B.E.; GREEN, S.R. TDR estimation of the resident concentration of electrolyte in the soil solution. *Australian Journal Soil Researches*, v.35, p.515-526, 1997.
- [11] VOGELER, I.; CLOTHIER, B.E.; GREEN, S.R.; SCOTTER, D.R.; TILLMAN, R.W. Characterizing water and solute movement by TDR and disk permeametry. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.60, n.1, p.5-12, 1996.
- [12] WRAITH, J.; DAS, B.S. Monitoring soil water and ionic solute distributions using time domain reflectometry. *Soil and Tillage Research*, v. 47, p.145-150. 1998.
- [13] WILLMONTT, C.J. *On the validation of models*. Physical Geography, New York, v.2, p.184-194, 1981.

Tabela 1. Coeficiente de concordância (D), parâmetros e coeficientes de determinação dos modelos (R²) e coeficiente angular da relação Y - δx entre o valor estimado (Y) e medido (x).

	D	Parâmetros						Ye-δYm	R ²
		a	b	c	d	a'	b'		
Equação (1)	0,9963	5,36808	1,49812	-	-	-	-	0,9736	0,8452
				0,37770	0,33260				
Equação (2)		-	-	-	-	0,009	-0,2422	-	0,9274
Equação (3)	0,9934	5,36808	1,49812	-	-	0,009	-0,2422	1,0111	0,7350
				0,37770	0,33260				

Referências

- [1] EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de Métodos de Análise de Solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p. (Embrapa - CNPS. Documentos, 1).
- [2] HEIMOVAARA, T.J., FOCKE, A.G., BOUTEN, W., VERSTRANTEN, J.M. Assessing temporal variations in soil water composition with time domain reflectometry. *Soil Science Society of America Journal*, v.59, p.689-698. 1995.
- [3] MMOLAWA, K., OR, D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: a review. *Plant and Soil*, v. 222, p. 163-190, 2000.
- [4] MUÑOZ-CARPENA, R.; REGALADO, C.M.; ALVAREZ-BENEDÍ, J.; SOCORRO, A.R.; PÉREZ, N. Determinación simultánea mediante TDR del transporte de agua y un soluto salino en el suelo. In: López, J.J.; Quemada, M. ed. V. Temas de Investigación en Zona no Saturada. Pamplona: Universidade Pública de Navarra, 2001, p.1-7.
- [5] MUALEM, Y., FRIEDMAN, S.P. Theoretical predictions of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. *Water Resources Research*, v. 27, p. 2771-2777. 1991.