

ARTIGO TÉCNICO

CALIBRAÇÃO DA REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO (TDR) PARA A ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DA SOLUÇÃO NO SOLO¹

CLAUDINEI F. SOUZA², MARCOS V. FOLEGATTI³, EDSON E. MATSURA⁴, DANI OR⁵

RESUMO: A Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) é um método confiável para medidas *in situ* da umidade e da concentração da solução no mesmo volume de solo. Entretanto, a interpretação precisa da medida de condutividade elétrica do solo (e umidade do solo) pode requerer uma curva de calibração específica. O objetivo principal deste ensaio foi estabelecer um procedimento de calibração para usar a TDR no cálculo de concentrações de nitrato de potássio (KNO₃) em solução do solo. Uma equação que relaciona a condutividade elétrica medida pela TDR e a concentração de KNO₃ foram encontradas viabilizando o uso da técnica da TDR na estimativa da umidade e da concentração da solução do solo para o manejo eficiente da fertirrigação.

PALAVRAS-CHAVE: concentração de íons, fertirrigação, nitrato de potássio.

TIME DOMAIN REFLECTOMETRY (TDR) CALIBRATION FOR ESTIMATING SOIL SOLUTION CONCENTRATION

ABSTRACT: Time Domain Reflectometry (TDR) is a reliable method for *in-situ* measurements of the humidity and the solution concentration at the same soil volume. Accurate interpretation of electrical conductivity (and soil humidity) measurements may require a specific calibration curve. The primary goal of this work was to establish a calibration procedure for using TDR to estimate potassium nitrate concentrations (KNO₃) in soil solution. An equation relating the electrical conductivity measured by TDR and KNO₃ concentration was established enabling the use of TDR technique to estimate soil water content and nitrate concentration for efficient fertigation management.

KEYWORDS: ions concentration, fertigation, potassium nitrate.

INTRODUÇÃO

A concentração da solução no solo é de fundamental importância para a agricultura, principalmente pelo conhecimento de sua variação na otimização do manejo da fertirrigação. Existem vários métodos para a sua determinação com vantagens e limitações.

Entre as técnicas utilizadas, o uso de extratores é bastante popular entre os pesquisadores por apresentar resultados precisos a um custo relativamente baixo. Entretanto, para medidas *in situ*, o acondicionamento de extratores reduz a precisão dos resultados, alterando o local em estudo (importante nos casos de medidas repetidas em pequena área) e limitando a obtenção de resultados em curto espaço de tempo.

Para estimativas precisas da umidade e da concentração da solução do solo em laboratório e em campo, existe uma tendência para a utilização da técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR). Para o uso dessa metodologia, é necessária a confecção de uma curva de calibração para cada

¹ Parte do projeto de pós-doutoramento do primeiro autor.

² Depto de Engenharia Civil, Universidade de Taubaté, UNITAU, Taubaté - SP, Fone: (0XX12) 225.4297, claudinei@unitau.br

³ Prof. Doutor, Departamento de Engenharia Rural, ESALQ/USP, Piracicaba - SP.

⁴ Prof. Doutor, Departamento de Água e Solo, FEAGRI/UNICAMP, Campinas - SP.

⁵ Prof. Doutor, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Vaud, Suíça.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 20-9-2004

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 21-12-2005

tipo de solo, sendo considerado um inconveniente normalmente aceitável comparado com as vantagens que apresenta em relação a outras técnicas.

As vantagens inerentes da técnica da TDR, como a precisão, o fato de ser um método não-destrutivo, a não-utilização de radiação ionizante e a possibilidade de automação e de acoplamento a dispositivos multiplicadores de leituras são justificativas fortes para a adoção cada vez maior da técnica em substituição a outros métodos (TOPP et al., 1980; COELHO & OR, 1996).

A TDR tem sido utilizada para a avaliação do movimento de solutos no solo (WARD et al., 1995; NADLER et al., 1999; BEJAT et al., 2000; MMOLAWA & OR, 2000). Tal aplicação pode trazer benefícios para a pesquisa em fertirrigação, de forma a fornecer subsídios ao estudo da dinâmica de solutos sob diferentes manejos de fertirrigação.

Talvez um dos maiores problemas seja referente à linearização proposta por RHOADES et al. (1976), relacionando a condutividade elétrica aparente medida pela TDR (CE_{TDR} - ar+solo+água) em função da condutividade elétrica da solução do solo (CE_s) medida por meio do extrato de saturação proveniente da pasta saturada. Segundo NADLER (1997), essa relação é complexa e, geralmente, encontram-se situações não-lineares decorrentes de reações químicas oriundas da diluição da solução, as quais promovem imprecisões nas determinações da CE_s . A teoria básica para a relação entre CE_s - CE_{TDR} é afetada por três fatores: i) redução da área transversal disponível para a movimentação do íon (tortuosidade); ii) interações elétricas (polarização e efeitos de dispersão), e iii) mudanças no arranjo estrutural da água absorvida pela superfície de partícula do solo. A tortuosidade pode ser definida como a relação do caminho indireto, direto e o caminho de fluxo, ou seja, a relação da duração média da passagem da água pelos poros. A condutância superficial está associada com a capacidade de troca de íons entre a interface sólido-líquido.

Todos esses fatores são afetados pela textura, salinidade e variação da umidade do solo, as quais são responsáveis pela não-linearidade da relação CE_s - CE_{TDR} . Dessa forma, e devido às características particulares dos solos brasileiros mais intemperizados com a presença de altos teores de óxidos de ferro ou de materiais magnéticos, baixos teores de matéria orgânica, temperatura média elevada, dentre outros, existe a necessidade de pesquisa urgente para a validação e/ou adaptação dessa técnica para as nossas condições específicas de solo (GUPTA & HANKS, 1972; NADLER, 1982, 1993).

Cientes desses problemas e conhecendo-se previamente algumas limitações da técnica de TDR para a estimativa da concentração da solução no solo para as condições brasileiras, justifica-se efetuar um estudo prévio com o solo deformado de maneira a eliminar, inicialmente, as diversas variáveis presentes, a fim de facilitar o estudo. Com isso, podem-se antecipar possíveis problemas de campo, como a calibração inadequada, a instalação de sondas e erros na interpretação gráfica da impedância do meio (esse último é importante na estimativa da concentração da solução no solo).

O objetivo principal deste ensaio foi estabelecer um procedimento de calibração para usar a TDR no cálculo de concentrações de nitrato de potássio (KNO_3) em solução do solo, baseando-se na metodologia proposta por RHOADES et al. (1976) e MMOLAWA & OR (2000).

MATERIAL E MÉTODOS

O material de solo foi retirado de um perfil de 0-0,30 m, classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, fase arenosa, denominado Série "Sertãozinho", localizado nas coordenadas geográficas de 22°43'14" de latitude sul e 47°36'47" de longitude oeste, no município de Piracicaba -SP. Após a extração, o material solo foi transportado para o Laboratório de Hidráulica e Irrigação da FEAGRI/UNICAMP, onde o mesmo foi seco ao ar, passado em peneira com malha de 2 mm e acondicionado em recipientes plásticos. O volume total de solo extraído foi de 0,1 m³, suficiente para a

realização de todo o ensaio de calibração. As principais características físicas e químicas desse solo são apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1. Características físicas e químicas do solo na camada de 0-30 cm.

Físicas										
Densidade do solo (kg m ⁻³)		Porosidade Total (%)			Textura (g kg ⁻¹)					
					Argila	Silte	Areia			
1.428		46			170	110	720			
Químicas										
pH CaCl ₂	P μg cm ⁻³	M.O. (%)	H+Al -----mmol _c dm ⁻³ -----	K	Ca	Mg	S	CTC	V (%)	
4,6	5	0,69	31	1,8	24	9	34,8	65,6	53	

Metodologia de calibração

Em laboratório, realizou-se o procedimento descrito por MMOLAWA & OR (2000), no qual, inicialmente, correlacionou-se a condutividade elétrica da solução medida por um condutivímetro de bancada e a concentração do nutriente em solução (C) entre 0-180 mmol L⁻¹. A equação utilizada para estimar as diferentes concentrações da solução durante o ensaio foi:

$$C = \frac{M}{V_s} \quad (1)$$

em que,

M - massa do nutriente, g, e
V_s - volume da água, cm³.

O fertilizante utilizado no ensaio foi o nitrato de potássio (KNO₃), pois tanto o nitrogênio como o potássio apresentam grande mobilidade no solo, comportamento desejável em estudos de dinâmica de íons na solução do solo. Além disso, a concentração dos íons de nitrato pode ser facilmente estimada por medidores com eletrodos seletivos.

A calibração da TDR para a estimativa da concentração da solução (C, mmol L⁻¹) é possível segundo os estudos realizados por RHOADES et al. (1976), no qual os autores trabalham com uma relação ajustada por um fator de tortuosidade (τ) e uma estimativa da condutância superficial (CE_{cs}, dS m⁻¹) para a determinação da correlação entre a condutividade elétrica aparente (CE_{TDR}, dS m⁻¹) e a condutividade elétrica da solução no solo (CE_s, dS m⁻¹).

$$CE_s = \frac{CE_{TDR} - CE_{cs}}{\tau \theta} \quad (2)$$

Para a estimativa da condutividade elétrica aparente, a técnica da TDR baseia-se na impedância característica da sonda. Para isso, o programa WinTDR 6.0 (Utah State University, UT, EUA) analisou a impedância causada pelo meio estudado, utilizando um testador de cabos da Tektronix modelo 1502 C (Figura 1), e por diferença estimou a condutividade elétrica aparente pela eq.(3) (GIESE & TIEMANN, 1975):

$$CE_{TDR} = \frac{Z_0}{120\pi 20} \left(\frac{2V_0}{V_{inf}} - 1 \right) \quad (3)$$

em que,

CE_{TDR} - condutividade elétrica aparente, $dS\ m^{-1}$;

L - comprimento da sonda, m;

Z_0 - impedância característica da sonda, ohm (obtido em água destilada, SOUZA et al., 2004);

Z_u - impedância no cabo ~ 50 ohms;

V_0 - amplitude do sinal eletromagnético gerado pela TDR, m, e

V_{inf} - amplitude do sinal eletromagnético depois da reflexão do início da sonda, m.

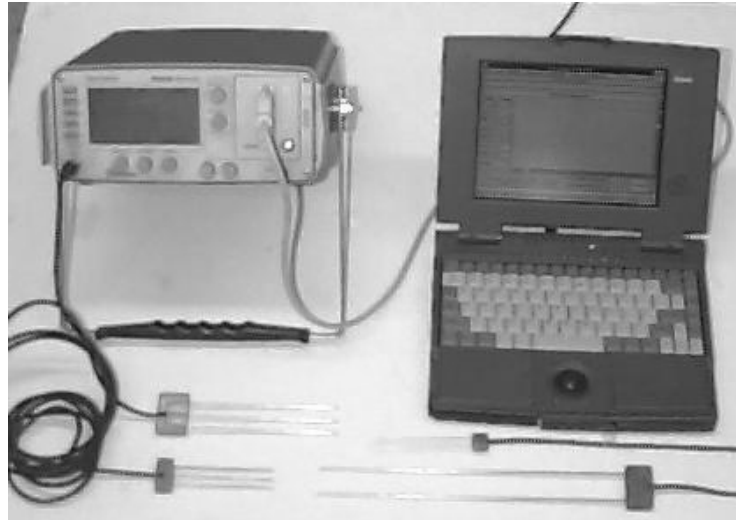


FIGURA 1. TDR Tektronix 1502 C acoplado a um computador, utilizando o programa WinTDR 6.0 como interface gráfica para o cálculo da condutividade elétrica aparente.

A técnica da TDR também é uma forma indireta para estimar a umidade volumétrica do solo (θ). Assim sendo, o uso de equação de calibração torna-se imprescindível para a conversão da constante dielétrica aparente (K_a) em umidade volumétrica do solo. Dessa forma, utilizou-se a equação proposta por TOMMASELLI & BACCHI (2001) para o mesmo solo em estudo, Latossolo Vermelho-Amarelo.

$$\theta = -0,0202 + 0,0257K_a - 0,0007K_a^2 + 1 \times 10^{-5} K_a^3 \quad (4)$$

A CE_{cs} e τ foram estimadas a partir de um ensaio utilizando-se de nove recipientes de plástico (10 L), preenchidos com solo, divididos em três repetições (Figura 2), os quais foram saturados com três soluções de condutividade elétrica distintas: 0 (água destilada), 10 e 20 $dS\ m^{-1}$. A água do solo evaporou com o tempo e, conseqüentemente, alterou a condutividade elétrica da solução do solo devido ao aumento na concentração iônica. Com o auxílio de sondas de TDR (Figura 3), instaladas na posição horizontal no centro da amostra, foram estimadas simultaneamente a umidade volumétrica e a condutividade elétrica aparente nas diferentes fases de secagem do solo.

A metodologia proposta por RHOADES et al. (1976) determina que a concentração da solução do solo deve ser estimada como função da umidade do solo, o que possibilita a relação entre a CE_{TDR} e a CE_s para diferentes umidades preestabelecidas. Dessa maneira, aplica-se uma extrapolação gráfica, tendendo a $CE_s = 0$, para as diferentes curvas geradas pela relação entre CE_{TDR} e CE_s , com o propósito de adquirir uma aproximação do valor de CE_{cs} . Essa extrapolação gráfica revelou desigualdade entre a CE_s e CE_{TDR} , cuja teoria aponta o fenômeno da CE_{cs} como a responsável pela diferença, como afirma MMOLAWA & OR, 2000.

Na Figura 2, podem-se ainda observar os extratores de solução instalados em cada um dos recipientes, os quais foram utilizados para a determinação da CE_s correlacionada com a CE_{TDR} , nas diferentes umidades preestabelecidas. A tensão utilizada para a extração da solução do solo foi

equivalente a 80 kPa, aplicada via bomba de vácuo portátil (SILVA et al., 2003). A CE_{TDR} e CE_s do solo foram estimadas em função das umidades fixas de 0,40; 0,35; 0,30; 0,25; 0,20 e 0,15 $m^3 m^{-3}$.



FIGURA 2. Sondas de TDR e extratores de solução instalados nos recipientes plásticos com solo.

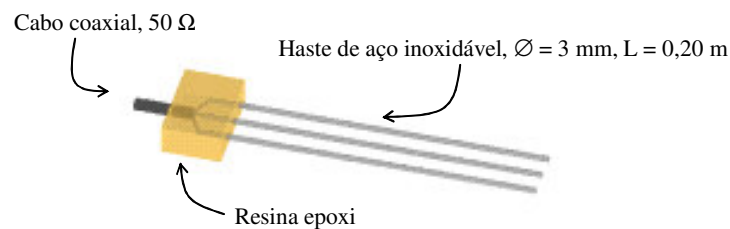


FIGURA 3. Representação esquemática da sonda de TDR utilizada.

Validação da metodologia

A validação da calibração foi conduzida em ambiente protegido de 100 m^2 . Em três recipientes de PVC, com dimensões de 0,65 m de altura e 1,10 m de diâmetro, distribuiu-se uma amostra do solo em camadas de 0,05 m que foram, a seguir, levemente compactadas de forma a reproduzir sua condição original de campo. Anterior a esse procedimento, o solo deformado foi seco e peneirado em tamis de 2 mm.

Em cada recipiente, 36 sondas de TDR contínuas foram instaladas em um único eixo central para a estimativa da condutividade elétrica aparente do solo em todo bulbo molhado. As sondas de medição foram distribuídas simetricamente em um eixo central com espaçamento de 0,10 m, formando malhas vertical e horizontal, onde cada sonda representa uma área de 0,01 m^2 , promovendo “medidas pontuais” em duas direções a partir do emissor. Assim, a condutividade elétrica no bulbo molhado foi determinada para a vazão de 4 $L h^{-1}$, aplicando-se 15 L de solução de nitrato de potássio ($C \cong 15 \text{ mmol } L^{-1}$), utilizando-se da calibração obtida para a conversão entre CE_{TDR} e CE_s . Um sistema com frasco de Mariote foi utilizado para manter a pressão no gotejador constante.

Após a determinação das constantes dielétricas pela TDR e da estimativa de condutividade elétrica do solo, retiraram-se amostras do solo nos pontos correspondentes e confeccionaram-se as pastas saturadas, conforme RICHARDS (1954) e, sob vácuo, retirou-se o extrato de saturação nos

quais se determinou a condutividade elétrica (CE_{pasta}). Os resultados foram comparados utilizando-se de um diagrama de dispersão e coeficiente de correlação.

RESULTADOS

Metodologia de calibração

Verificou-se um coeficiente de correlação satisfatório ($r^2 = 0,99$) entre as leituras de CE_s e a concentração de KNO_3 . Esse resultado comprova a existência de uma associação linear entre as diferentes estimativas e também indica variação direta no valor de CE_s , para uma unidade da concentração do KNO_3 , comprovando que suas características apresentam relação funcional na estimativa da concentração da solução do solo. Dessa forma, estimativas da concentração da solução por meio da condutividade elétrica podem substituir as realizadas por outras técnicas, promovendo agilidade e precisão (Figura 4).

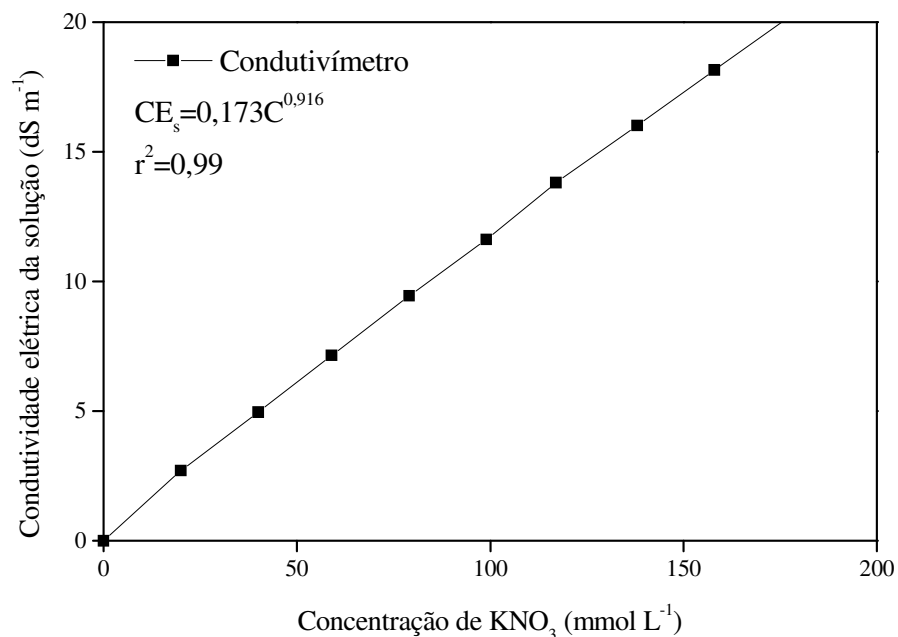


FIGURA 4. Correlação entre a CE medida e a concentração de KNO_3 na solução do solo realizada em laboratório. As medidas da CE foram realizadas por um condutivímetro de bancada (Marca Digimed - modelo DM3).

A CE_{cs} foi estimada extrapolando-se os gráficos da Figura 5A para $CE_s = 0$. A condutância de superfície do Latossolo Vermelho-Amarelo em estudo é $0,04 dS m^{-1}$ (Figura 5B).

O valor da tortuosidade, em função da umidade do solo, foi encontrado e correlacionado utilizando-se da eq.(2).

Na Figura 6, apresentam-se os valores obtidos, bem como a equação de ajuste dos dados [eq.(5)]:

$$\tau = 2,608 \theta - 0,165 \quad (5)$$

A seguir, utilizou-se da equação descrita por RHOADES et al. (1976) para relacionar CE_{TDR} com CE_s , como segue:

$$CE_s = \frac{CE_{TDR} - 0,04}{(2,608 \theta - 0,165) \theta} \quad (6)$$

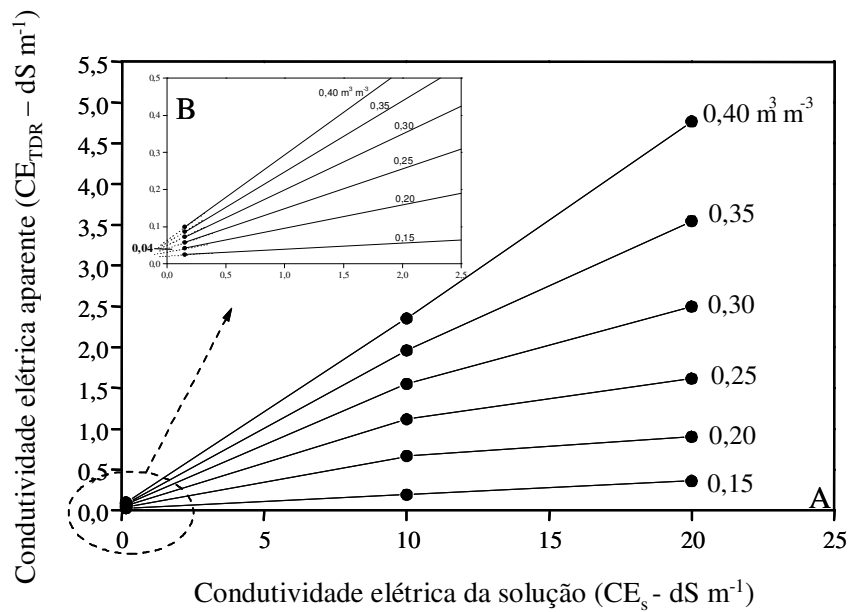


FIGURA 5. Correlação entre CE_{TDR} e CE_s para umidades fixas. Extrapolação dessas seis curvas para $CE_s=0$ para adquirir aproximação do valor de CE_{cs} .

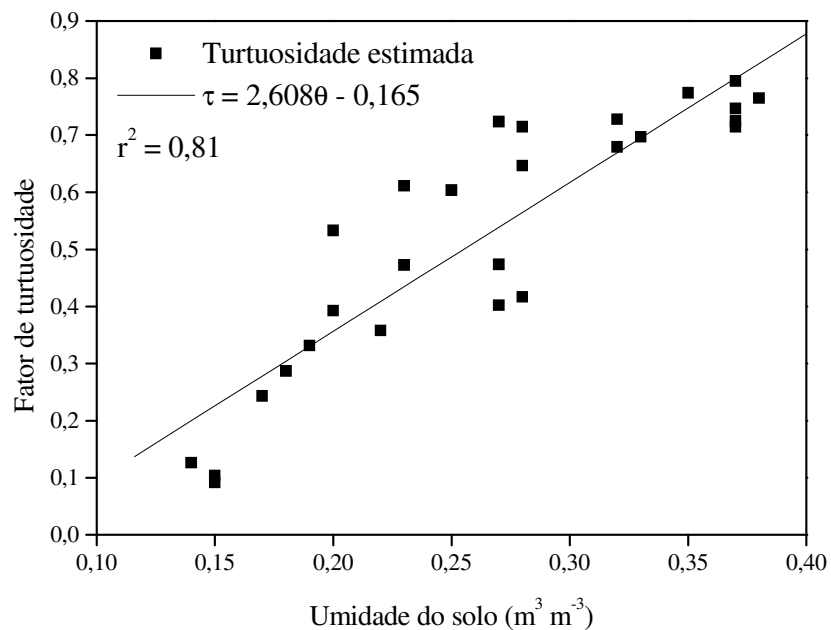


FIGURA 6. Modelo linear para correlacionar o fator de tortuosidade em função da umidade do Latossolo Vermelho-Amarelo.

Encontrada a relação entre CE_{TDR} e CE_s , a equação que relaciona C e CE_s pode ser utilizada para converter CE_{TDR} para C , para a condição de solo e nutriente em estudo.

$$C = \left[\frac{CE_s}{0,173} \right]^{1/0,916} \tag{7}$$

Validação da metodologia

Verificou-se um coeficiente de correlação satisfatório ($r^2 = 0,88$) entre as leituras de condutividade elétrica obtidas com as duas técnicas em questão (CE_{TDR} versus CE_{pasta}) e coeficiente angular da equação de regressão próximo de 1. Esses resultados comprovam existir uma associação linear entre as técnicas e indicam variação direta no valor de CE_{pasta} para uma unidade de CE_{TDR} , comprovando-se que suas características apresentam relação funcional na estimativa da condutividade elétrica do solo (Figura 7).

Dessa forma, a técnica da TDR pode substituir a técnica da pasta saturada, promovendo agilidade na estimativa, uma vez que o tempo envolvido na estimativa da condutividade elétrica do solo mediante a TDR é extremamente inferior à mesma determinação realizada pelo método-padrão, propiciando contribuições rápidas e precisas de forma que as informações possam ser usadas para auxiliar nas melhores decisões possíveis, dentro das condições de incerteza.

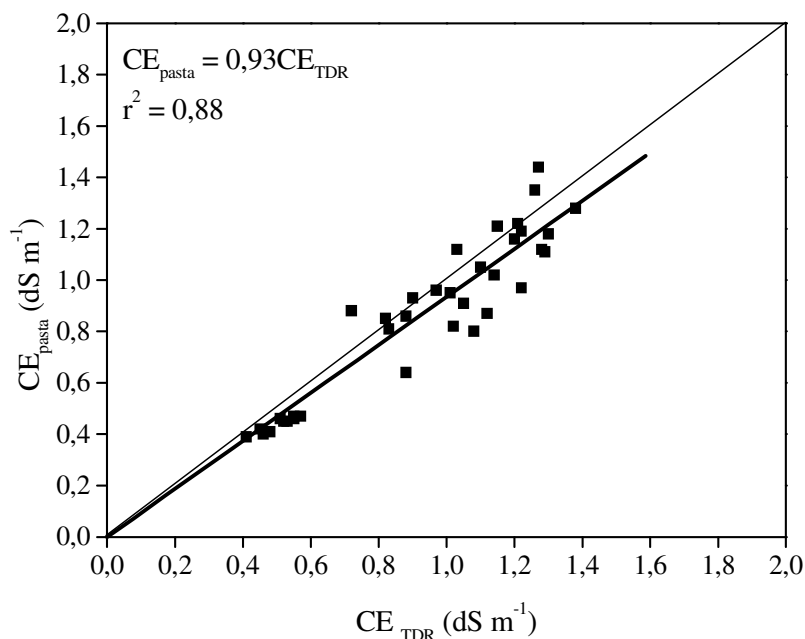


FIGURA 7. Relação entre os valores de condutividade elétrica do extrato de saturação (CE_{pasta}) e condutividade elétrica obtida pela técnica da TDR.

O perfil da salinidade do solo, confeccionado a partir das determinações da condutividade elétrica nos extratos saturados e nas estimativas pela TDR, está apresentado na Figura 8. Verifica-se semelhança entre os perfis, o que permite inferir boa estimativa da condutividade elétrica pela TDR em relação às medidas realizadas no extrato de saturação a cada ponto verificado.

As análises da condutividade elétrica da solução do solo obtidas demonstraram, preliminarmente, existir viabilidade na utilização da técnica da TDR, a qual apresentou, também, agilidade na estimativa sem alteração no meio amostrado. A metodologia de trabalho também se mostrou eficaz, pois a malha escolhida não apresentou nenhuma restrição à confecção de imagem bidimensional. Com a devida calibração, a TDR e a metodologia apresentada são muito promissoras no estudo da dinâmica da solução no solo com boa precisão. Os valores de condutividade elétrica estimados pela TDR mostraram-se superiores aos valores medidos no extrato de saturação em 7%, o que caracteriza pequena superestimativa pelo método analisado em relação ao padrão.

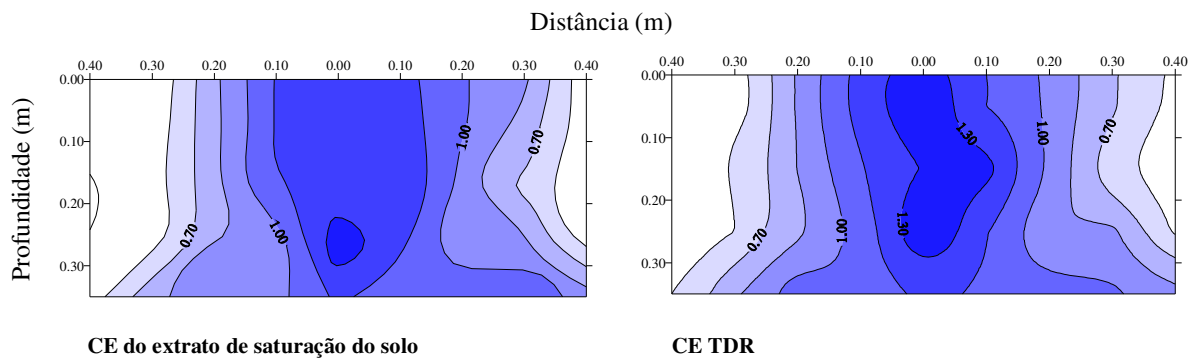


FIGURA 8. Comparação entre os perfis de salinidade do solo para os ensaios de determinação da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo *versus* a técnica da TDR.

Considerações finais

Duas limitações foram verificadas na aplicação da metodologia desenvolvida por RHOADES et al. (1976). A primeira consiste na dificuldade em se utilizarem extratores para a retirada da solução do solo; e a segunda, observou-se que o limite de concentração utilizado ($\cong 20 \text{ dS m}^{-1}$) é muito elevado.

Essas limitações dificultam estimar o fator de tortuosidade, as quais podem reduzir a sensibilidade da equação de calibração e colaborar para a não-linearização proposta por RHOADES et al. (1976), relacionando a condutividade elétrica medida pela TDR em função da condutividade elétrica da solução do solo.

Os extratores utilizados retiraram facilmente a solução no interior do solo em condições próximas à capacidade de campo, contudo, em condições em que o extrato foi obtido com o solo mais seco, a solução estava mais sujeita aos efeitos da interferência da energia potencial matricial na extração. Por essa razão, recomenda-se que a aplicação da solução durante o processo de saturação da amostra de solo não seja pontual, mas multiponto, para favorecer uma distribuição homogênea da solução, e também a utilização de mais de um extrator de solução por recipiente. Dessa forma, acredita-se garantir uma condição amostral representativa capaz de promover uma correlação mais precisa entre as diferentes técnicas de estimativa da condutividade elétrica do solo.

O limite de concentração da solução equivalente a 20 dS m^{-1} foi considerada um exagero para o manejo da fertirrigação. Esse intervalo de grande abrangência permite maior faixa de aplicação da calibração, porém admite maiores erros na estimativa da condutividade elétrica da solução. Dessa forma, sugere-se que seja realizada a calibração para um alcance menor ($0 - 10 \text{ dS m}^{-1}$), o que permitirá uma concentração maior de pontos medidos em uma faixa de calibração menor. Esse ajuste poderá aumentar a precisão dos valores estimados sem prejudicar o manejo da fertirrigação.

CONCLUSÕES

Foi obtida uma equação que relaciona a condutividade elétrica medida pela TDR e a concentração de KNO_3 , viabilizando o uso da técnica da TDR na estimativa da umidade e da concentração da solução do solo para o manejo eficiente da fertirrigação.

Para melhor precisão, quando comparado ao método-padrão (extrato de saturação), sugere-se realizar nova calibração com valores de concentração de solução inferiores aos utilizados por RHOADES et al. (1976).

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.

REFERÊNCIAS

- BEJAT, L.; PERFECT, E.; QUINSENBERRY, V.L.; COYNE, M.S.; HASZLER, G.R. Solute transport as related to soil structure in unsaturated intact soil blocks. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.64, n.3, p.818-26, 2000.
- COELHO, E.F.; OR, D. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.39, n.6, p.2007-16, 1996.
- GIESE, K.; TIEMANN, R. Determination of the complex permittivity from thin-sample time domain reflectometry: Improved analysis of the step response waveform. *Advances in Molecular Relaxation Processes*, Amsterdam, v.7, n.1, p.45-59, 1975.
- GUPTA, S.C.; HANKS, R.J. Influence of water content on electrical conductivity of the soil. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.36, n.6, p.855-7, 1972.
- MMOLAWA, K.; OR, D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review. *Plant and Soil*, Dordrecht, v.222, n.1-2, p.163-90, 2000.
- NADLER, A. Estimating the soil water dependence on the electrical conductivity soil solution/electrical conductivity bulk soil ratio. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.46, n.4, p.722-6, 1982.
- NADLER, A. Field measurements of solute travel times using time domain reflectometry. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.57, n.3, p.878-9, 1993.
- NADLER, A. Discrepancies between soil solute concentration estimates obtained by TDR and aqueous extracts. *Australian Journal of Agricultural Research*, Collingwood, v.35, n.3, p.527-37, 1997.
- NADLER, A.; GAMLIEL, A.; PERETZ, I. Practical aspects of salinity effect on TDR-measurement water content: a field study. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.63, n.5, p.1070-6, 1999.
- 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*, Madison, v.40, n.5, p.651-5, 1976.
- RICHARDS, L.A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington: United Salinity Laboratory, 1954. 160 p. (Agriculture Handbook, 60).
- SILVA, E.F.F.; DUARTE, S.N.; FOLEGATTI, M.V.; ROJAIS, E.G. Utilização de testes rápidos e extratores de solução no solo na determinação de nitrato e potássio. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.23, n.3, p.460-7, 2003.
- SOUZA, C.F.; OR, D.; MATSURA, E.E. A variable-volume TDR probe for measuring water content in large soil volumes. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.68, p.25-31, 2004.
- TOMMASELLI, J.T.G.; BACCHI, O.O.S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.36, n.9, p.1145-54, 2001.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water resources Research*, Washington, v.16, n.3, p.574-82, 1980.
- WARD, A.L.; KACHANOSKI, R.G.; ELRICK, D. E. Analysis of water and solute transport away from a point source. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.59, n.3, p.699-706, 1995.
- WINTDR. Time Domain Reflectometry soil sample analysis program. Disponível em: <<http://soilphysics.usu.edu/wintdr>>. Acesso em: 15 maio 2004.