



## CALIBRAÇÃO DE SONDAS DE TDR NO SOLO SOB DIFERENTES NÍVEIS DE SALINIDADE

EUGENIO FERREIRA COELHO<sup>1</sup>; WELSON LIMA SIMÕES<sup>2</sup>; LUCIO ADERITO VEINROBERT DOS ANJOS JUNIOR<sup>3</sup>; DELFRAN BATISTA DOS SANTOS; ALISSON JADAVI PEREIRA DA SILVA

<sup>1</sup> Engenheiro Agrícola, Ph.D., Embrapa mandioca e Fruticultura/Cruz das Almas-BA. E-mail: [ccoelho@cpmf.embrapa.br](mailto:ccoelho@cpmf.embrapa.br)

<sup>2</sup> Engenheiro Agrônomo, Pós-graduando UFV/Viçosa - MG.

<sup>3</sup> Graduando, UFRB/Cruz das Almas - BA.

<sup>4</sup> Engenheiro Agrônomo, professor, EASB/Senhor do Bomfim - BA.

Apresentado no  
XXXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola  
30 de julho a 02 de agosto de 2007 - Bonito - MS

**RESUMO:** A possibilidade de medir a condutividade elétrica e a umidade torna a reflectometria no domínio do tempo (TDR) atrativa para uso em transporte de solutos e em situações envolvendo presença de íons no sistema solo-água. Este trabalho teve por objetivo a calibração de três sondas de TDR de diferentes espaçamentos entre hastes e comprimentos de resina no início das hastes para leituras de umidade em solo sob diferentes níveis de salinidade. O experimento constou da aplicação de cinco níveis de umidade equivalentes a 40%, 60%, 80%, 100% e 120% da umidade à capacidade de campo e de sete níveis de salinidade no solo obtidos pela aplicação de soluções de cloreto de sódio e cloreto de cálcio de condutividades elétricas equivalentes a 0 dS m<sup>-1</sup>, 4 dS m<sup>-1</sup>, 7 dS m<sup>-1</sup>, 10 dS m<sup>-1</sup>, 13 dS m<sup>-1</sup>, 16 dS m<sup>-1</sup> e 19 dS m<sup>-1</sup>. Uma vez montadas as colunas de solo, após a aplicação dos tratamentos, usaram-se três sondas de TDR de espaçamento entre hastes e comprimento de resina no início das hastes de 0,03 m e 0,045 m; 0,02 m e 0,035 m e 0,025 m e 0,055 m para leituras de umidade nas colunas de solo. Na avaliação do desempenho das sondas quanto a calibração para leituras de umidade, utilizou-se do coeficiente de determinação do ajuste do modelo, do coeficiente angular da função umidade estimada ou lida pela TDR x umidade gravimétrica, com intercepto em zero, do coeficiente de concordância (W), proposto por Willmontt, do desvio médio, máximo e mínimo entre as umidades lidas e obtidas por gravimetria. Houve influência da salinidade na determinação da umidade do solo pela TDR. A sonda com espaçamento entre hastes de 0,03 m e comprimento da resina de 0,045 m no início da mesma mostrou-se mais adequada para uso em solos com condutividade elétrica até 1,9 dSm<sup>-1</sup>.

**PALAVRAS-CHAVE:** TDR, guias de onda, salinidade

### TDR PROBE CALIBRATION UNDER DIFFERENT LEVELS OF SALT IN THE SOIL

**ABSTRACT:** The possibility of measuring soil bulk electrical conductivity and water content makes the time domain reflectometry (TDR) attractive for using in solute transport and in situations with presence of ions in the soil solution. This work had as objective the calibration of three TDR probes of different spacing between rods and length of epoxy in the beginning of the probe for determining soil water content under different levels of salinity. The experiment involved five levels of soil water content such as a 40%, 60%, 80%, 100% e 120% of water content at field capacity and seven levels of soil salinity obtained by the application of sodium chloride and calcium chloride of electrical conductivities of 0 dS m<sup>-1</sup>, 4 dS m<sup>-1</sup>, 7 dS m<sup>-1</sup>, 10 dS m<sup>-1</sup>, 13 dS m<sup>-1</sup>, 16 dS m<sup>-1</sup> e 19 dS m<sup>-1</sup>. After experiment had been set, three TDR probes of spacing between rods and length of epoxy in the beginning of the probe of 0,03 m and 0,045 m; 0,02 m and 0,035 m and 0,025 m and 0,055 m were used for soil water content readings in the soil columns. The performance of the probes for soil water content readings required the use of goodness of fit, angular coefficient of the estimated soil water content as a linear function of

measured soil water content with intercept in zero, agreement coefficient (W) by Willmont, mean, maximum and minimum deviation of estimated and measured soil water contents. There was influence of salinity on the readings of soil water content by TDR. The probe of 0.03 m spacing between rods and 0.045 m epoxy length showed as most adequate for using in soils of electrical conductivity up to  $1.9 \text{ dSm}^{-1}$ .

**KEYWORDS:** TDR, wave guides, salinity

**INTRODUÇÃO:** A possibilidade de medir a condutividade elétrica e a umidade torna a reflectometria no domínio do tempo (TDR) atrativa para uso em transporte de solutos e em situações envolvendo presença de íons no sistema solo-água (ELRICK et al., ; KACHANOSK et al., ). O uso da TDR, no entanto, apresenta desvantagem em condições de salinidade do solo limitando-se a solos de baixa condutividade elétrica (MALLANTS et al., 1996). No meio poroso a fase líquida pode ser dividida em duas partes, uma que fica em contato direto com as micelas do solo eletricamente carregadas e outra, mais espessa, constituindo-se na solução do solo, onde ocorre diversos íons em solução. Ambas as camadas causam perdas dielétricas que interferem na análise da umidade do solo pela TDR, o que é mais pronunciado para solos argilosos (DIRKSEN & DASBERG, 1993; HEIMOVAARA, 1994). Solos com maior concentração de sais terão maior efeito dessas perdas na determinação de umidade. A relação entre a constante dielétrica aparente do solo com a umidade, representada por diferentes modelos matemáticos citados na literatura (COELHO et al., 2005) pode não ser funcional para solos de maior superfície específica, orgânicos ou de salinidade mais acentuada (DIRKSEN & DASBERG, 1993; ROTH et al., 1990). Este trabalho teve por objetivo a calibração de três sondas de TDR de diferentes espaçamentos entre hastes e comprimentos de resina no início das hastes para leituras de umidade em solo com presença de salinidade.

**MATERIAL E MÉTODOS:** O experimento foi realizado no Laboratório de Irrigação e fertirrigação da Limbrapa Mandioca e Fruticultura, a partir de um solo de textura argilosa, com as seguintes características físicas: areia total  $590 \text{ g kg}^{-1}$ , silte  $95 \text{ g kg}^{-1}$ , argila  $315 \text{ g kg}^{-1}$ , densidade do solo de  $1,33 \text{ kg dm}^{-3}$ , de partículas  $2,50 \text{ kg dm}^{-3}$  e porosidade total 32%. 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. Todo o material envolvido no processo, isto é, o solo seco ao ar, as colunas de PVC, os plásticos foram inicialmente pesados. O experimento constou de promover ao solo cinco níveis de umidade (40%, 60%, 80%, 100% e 120% da umidade à capacidade de campo) sob sete níveis de salinidade no solo a serem obtidos 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),  $4 \text{ dS m}^{-1}$ (CE2),  $7 \text{ dS m}^{-1}$ (CE3),  $10 \text{ dS m}^{-1}$ (CE4),  $13 \text{ dS m}^{-1}$ (CE5),  $16 \text{ dS m}^{-1}$ (CE6) e  $19 \text{ dS m}^{-1}$ (CE7). Foram utilizadas 35 colunas de PVC. O volume de solução aplicado para cada nível de umidade foi calculado com base na curva de retenção de água do solo, cuja capacidade de campo correspondeu a umidade de  $0,3342 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ . 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 feita as leituras de umidade em cada coluna com uso de o analisador de umidade TDR com dispositivos de leitura por computador ou datalogger. Foram usadas três sondas de TDR de 0,10 m de comprimento da haste livre para inserção no solo e 0,015 m da mesma dentro da resina de poliéster: S1 com distância entre hastes de 3,0 cm e comprimento de resina de poliéster de 4,5 cm; S2 com distância entre hastes de 2,0 cm e comprimento de resina de poliéster de 3,5 e S3 com distância entre hastes de 2,5 cm e comprimento de resina de poliéster de 5,5 cm. Foram feitas três repetições de leituras com cada sonda; após as leituras o solo contido na região das leituras dentro da coluna, isto é, num raio de 0,03 m da haste com profundidade de 0,10m equivalente ao comprimento da sonda, foi retirado para determinação de umidade gravimétrica com uso de estufa. Os dados de umidade gravimétrica transformados em base volumétrica

foram organizados juntamente com as leituras da TDR para as diferentes umidades, condutividades elétricas e sonda. Determinou-se para cada leitura de umidade ( $\theta$ ) a constante dielétrica aparente ( $\epsilon$ ), uma vez que o equipamento usa a equação de LEDIEU et al. (1988).

$$\theta = 0,1138\sqrt{\epsilon} - 0,1758 \quad (1)$$

Uma vez obtida  $\epsilon$ , a mesma foi relacionada aos valores de umidade obtidos por gravimetria, para as diferentes situações de salinidade do solo. Na calibração das sondas foi usado o modelo polinomial cúbico  $\theta = ae^3+be^2+ce+d$ , definido como mais adequado conforme COELHO et al. (2005). A calibração foi necessária cada nível de salinidade pois quando se testou para todas as umidades e CE juntas o modelo não fez um ajuste adequado. Os ajustes do modelo cúbico foram feitos para os níveis de salinidade CE1, CE2 e CE3 juntos em todos os casos, os demais níveis de salinidade foram trabalhados isolados, em conjunto ou não puderam ser trabalhados devido a inoperância do analisador de umidade. Na avaliação do desempenho das sondas, utilizou-se do coeficiente de determinação do ajuste do modelo, do coeficiente de linearidade da função umidade estimada ou lida pela TDR x umidade gravimétrica, com intercepto em zero, do coeficiente de concordância (W), proposto por WILLMONTT (1981), do desvio médio, máximo e mínimo entre as umidades lidas e obtidas por gravimetria. O W expressa o grau de exatidão das estimativas em relação aos valores observados, variando de zero, que indica nulidade, a 1 que indica perfeita exatidão.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** A Tabela 1 apresenta as condutividades elétricas médias lidas pelas sondas S1, S2 e S3 para as umidades propostas.

Tabela 1. Condutividade elétrica média aparente do solo ( $\text{dSm}^{-1}$ ) referente as diferentes soluções aplicadas nas colunas para todas umidades.

Sonda de TDR	Condutividade elétrica da solução aplicada na coluna de solo ( $\text{dSm}^{-1}$ )						
	CE1 0	CE2 4	CE3 7	CE4 10	CE5 13	CE6 16	CE7 19
S1	0,1103	0,4642	1,0510	1,0988	1,2626	1,2251	0,8288
S2	0,1555	0,4549	0,7755	1,1377	1,4535	1,255	0,9545
S3	0,09812	0,4343	0,7764	1,1755	1,5179	1,3218	0,8830

As leituras de CE e umidade do solo foram possíveis para todas as sondas para os níveis de salinidade do solo equivalentes a aplicação das soluções com condutividades elétricas até 10  $\text{dS m}^{-1}$ . Nas colunas de solo onde foram aplicadas soluções acima de 10  $\text{dS m}^{-1}$  as leituras foram possíveis para umidades do solo iguais ou inferiores a 80% da capacidade de campo para aplicação de CE5 e para umidades iguais ou inferiores a 60% da capacidade de campo para aplicação de CE6 e CE7. A avaliação individual das sondas levou a verificar que somente S1 permitiu ajuste do modelo polinomial cúbico em todos os níveis de salinidade. No caso de S2 e S3 não houve possibilidade de ajuste do modelo aos dados para CE6 e CE7. A Tabela 1 mostra que as leituras da condutividade elétricas apresentam confiabilidade até a aplicação de 13  $\text{dSm}^{-1}$ . Desta forma evitou-se as análises para as colunas de solo onde foram aplicadas soluções de condutividades 16 e 19  $\text{dSm}^{-1}$ . A Tabela 2 mostra, para as sondas os modelos polinomiais ajustados aos dados de umidade, com os indicadores da precisão dos modelos. Sonda S1 foi a que apresentou os melhores indicadores de desempenho do modelo por apresentar os menores desvios médio, máximo e mínimo entre os valores de umidade lidos pela TDR e medidos por gravimetria, além dos maiores coeficientes de determinação. O coeficiente angular da reta  $\theta$  estimado = a.  $\theta_{\text{gravimetria}}$  foram muito próximos da unidade para R2 acima de 0,93. Exceto para CE4 (10  $\text{dSm}^{-1}$ ), os coeficientes de Willmontt foram muito próximos da unidade. As sondas S2 e S3 apresentaram indicadores elevados para leituras de umidade para condutividades elétricas da solução aplicada de até 10  $\text{dSm}^{-1}$  (CE4), entretanto esses parâmetros mostraram um desempenho inferior dessas sondas em relação a S1, pelos valores de  $R^2$  tanto do modelo polinomial como da relação  $\theta_{\text{estimado}} = a. \theta_{\text{gravimetria}}$  e pelos maiores desvios médios apresentados. Esses resultados evidenciam a influencia da salinidade na determinação da

umidade do solo, em concordância com DIRKSEN & DASBERG (1993) e HEIMOVAARA (1994), o que seria atribuído as perdas dielétricas causadas, principalmente pela solução do solo, com maior concentração iônica. No caso da S1, a maior condutividade elétrica aparente do solo registrada com leitura correta de umidade foi de  $1,9 \text{ dSm}^{-1}$ . Os resultados evidenciam portanto a possibilidade uso da TDR para condições moderadas de presença de sais no solo. Não se recomenda uso da TDR com as sondas avaliadas nesse trabalho para determinação de umidade ou da condutividade elétrica em solos com condutividade elétrica acima de  $1,9 \text{ dSm}^{-1}$ .

Tabela 2. Equações para calibração das sondas de TDR e parâmetros de precisão D (coeficiente de Willmont), DM (desvio médio), Dmax (desvio máximo), Dmin (desvio mínimo) do modelo polinomial para estimativa da umidade sob diferentes níveis de salinidade.

Sonda a	CE média ( $\text{dSm}^{-1}$ )	Equação de calibração	R <sup>2</sup> Equação	Coefic. angular	R <sup>2</sup> y = ax	D	DM	Dmax x	Dmin
1	0,11-1,05	$\theta = -1,2 \cdot 10^{-5} e^3 + 0,00117 e^2 - 0,02866 e + 0,4505$	0,95	0,999	0,94	0,9868	3,48	7,41	0,56
1	1,09	$\theta = -9,6 \cdot 10^{-5} e^3 + 0,001018 e^2 - 0,02868 e + 0,4505$	0,93	0,992	0,93	0,7158	4,66	8,40	0,98
1	1,26	$\theta = -0,00021 e^4 + 0,00792 e^3 - 0,08372 e^2 + 0,44172$	0,97	1,001	0,95	0,9904	2,38	3,51	2,00
2	0,15 - 0,77	$\theta = -1,7 \cdot 10^{-5} e^3 + 0,00143 e^2 - 0,03121 e + 0,4505$	0,90	0,997	0,89	0,9950	4,2	13,4	0,17
2	1,13	$\theta = -1,3 \cdot 10^{-5} e^3 + 0,00124 e^2 - 0,0307 e + 0,4504$	0,99	1,00	0,99	0,9994	0,57	1,35	0,005
2	1,45	$\theta = -1,2 \cdot 10^{-5} e^3 + 0,00112 e^2 - 0,0276 e + 0,4487$	-	1,16	0,81	-	16,44	23,15	10,92
3	0,09 - 0,77	$\theta = -1,2 \cdot 10^{-5} e^3 + 0,00117 e^2 - 0,02866 e + 0,4505$	0,83	0,98	0,89	0,9704	5,18	8,28	0,19
3	1,17	$\theta = -9,6 \cdot 10^{-5} e^3 + 0,00102 e^2 - 0,0286 e + 0,4505$	0,91	0,993	0,92	0,9772	5,99	8,9	4,54
3	1,51	$\theta = -1,32 \cdot 10^{-5} e^3 + 0,00110 e^2 - 0,028 e + 0,4797$	0,198	1,03	-	-	13,2	16,5	10,92

**CONCLUSÕES:** Houve influencia da salinidade na determinação da umidade do solo pela TDR. A sonda com espaçamento entre hastes de 0,03 m e comprimento da resina de 0,045 m no início da mesma mostrou-se mais adequada para uso em solos com condutividade elétrica até  $1,9 \text{ dSm}^{-1}$ .

## REFERÊNCIAS

- COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; LEDO, C. A. da S. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 30, p. 23-30, 2006.
- DIRKSEN, C.E., AND S. DASBERG. Four component mixing model for improved calibration of TDR soil water content measurements. *Soil Science Society of America Journal*, v. 57, p. 660-667. 1993.
- ELRICK, D.E., R.G. KACHANOSKI, E.A. PRINGLE, AND A.L. WARD. Parameter estimates of field solute transport models based on time domain reflectometry measurements. *Soil Science Society of America Journal*, v. 56, p. 1663-1666. 1992.
- HEIMOVAARA, T.J. Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms 1. Measurement of the complex permittivity of soils. *Water Resources Research*, v. 30, p. 189-1994.
- KACHANOSKI, R.G., E. PRINGLE, AND A. WARD. Field measurement of solute travel times using time domain reflectometry. *Soil Science Society of America Journal* v. 56, p. 47-52. 1992.
- LEDIEU, J.; DE RIDDER, P.; DE CLERCK, P. & DAUTREBANDE, S., A method measuring soil water moisture by time-domain reflectometry. *Journal Hydrology*, v. 88, p. 319-328, 1986.
- MALLANTS, M. VANCLOOSTER, N. TORIDE, J. VANDERBORGHT, M. TH. VAN GENUCHTEN; J. FEYEN. Comparison of three methods to calibrate TDR for monitoring solute movement in undisturbed Soil Science Society of America Journal, v. 60, p. 747-754, 1996.
- ROTH, K., R. SCHULIN, H. FLUHLER, AND W. Attinger. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Research*, v. 26, p. 2267-2273. 1990.