

CALIBRAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO TDR EM CONDIÇÕES DE CAMPO

Rosangela Villwock; Maria Hermínia Ferreira Tavares; Márcio Antônio Vilas Boas

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, mhstavar@certto.com.br

1 RESUMO

A utilização da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) tornou-se um método muito bem aceito nas avaliações de teores de água no solo. Todavia, para utilização do equipamento há a necessidade de calibrá-lo para que se obtenha valores acurados de umidade volumétrica, devendo-se sempre respeitar as peculiaridades de cada solo para que o processo de calibração ocorra de forma correta. O objetivo deste trabalho foi calibrar o equipamento TDR em condições de campo, especificamente para um Latossolo Vermelho distroférico, localizado no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel. O modelo polinomial cúbico foi o que melhor se ajustou aos dados para a calibração do equipamento.

UNITERMOS: constante dielétrica aparente, modelo polinomial cúbico, umidade do solo.

**VILLWOCK, R.; TAVARES, M. H. F.; VILLAS BOAS, M. A.
TDR EQUIPMENT CALIBRATION IN FIELD CONDITIONS**

2 ABSTRACT

The use of Time Domain Reflectometry (TDR) has become a very well accepted method to evaluate soil water content. However, for the equipment utilization there is the need to calibrate it to obtain accurate values of volumetric soil water content, always respecting the soil characteristics. The objective of this research was to calibrate the TDR equipment in field conditions, specifically for a Rhodic Hapludox, at the UNIOESTE Experimental Station of Agricultural Engineering, in the campus of Cascavel, State of Parana. The cubic polynomial model was the model that best adjusted the data for the calibration of the equipment.

KEYWORDS: apparent dielectric constant, cubic polynomial model, soil moisture.

3 INTRODUÇÃO

Dentre os vários métodos existentes para a determinação do teor de água no solo, destaca-se a técnica da TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo), a qual tem sido objeto de inúmeros trabalhos. Dentre os artigos publicados a respeito, deve-se ressaltar Noborio (2001), o qual faz uma cuidadosa revisão sobre as medidas do conteúdo de água no solo e da condutividade elétrica usando a técnica da TDR. Já Comegna et al. (1999) mostram em seu estudo que a técnica da TDR apresenta resultados satisfatórios, indicando a aplicabilidade de seu emprego tanto em campo quanto em laboratório. Porém, tal equipamento necessita de calibração para que se obtenha o valor correto da umidade volumétrica, devendo-se respeitar as peculiaridades de cada solo para que o processo de calibração ocorra de forma correta. Tal calibração é exigida em especial quando se trabalha com latossolos, devido principalmente a algumas particularidades, como por exemplo: alto teor de ferro (da ordem de 70 mg dm^{-3}), alto teor de argila (maior do que 60%) e expansibilidade. A calibração do aparelho, fornecida pelo fabricante, não observa tais particularidades.

Apresentando resposta rápida e precisa, o equipamento de TDR registra o tempo de deslocamento do sinal na guia da TDR e converte este valor para a constante dielétrica aparente (K_a), segundo a equação:

$$K_a = \left(\frac{t \quad x \quad c}{2L} \right)^2, \quad (1)$$

onde t é o tempo de deslocamento (ns), c é a velocidade da luz (30 cm/ns) e L é o comprimento da guia (cm), sendo o conteúdo de água no solo determinado a partir da constante dielétrica aparente lida.

Os equipamentos comerciais (SOIL MOISTURE EQUIPMENT CORPORATION, 1998) trazem uma tabela de conversão para se determinar o conteúdo de água, porém, tal tabela não tem se mostrado adequada para todos os tipos de solo. Tommaselli (2001) mostra que a curva de calibração do equipamento foi obtida empregando-se três tipos de solos: um arenoso, um argiloso e um de textura média. A

respectiva tabela contém 17 pares de pontos e o valor de θ em função de K_a é obtido por interpolação linear, usando o valor imediatamente acima e o valor imediatamente abaixo ao valor lido. Depois de relacionar os valores obtidos pelo método gravimétrico e pelo equipamento, este autor afirma não aceitar a calibração fornecida pelo fabricante.

A técnica TDR apresenta vantagens como a rapidez na obtenção da umidade volumétrica (TOMMASELLI, 1997), a repetibilidade das leituras, a não destruição da região amostrada, a não emissão de radiações ionizantes, a portabilidade e a facilidade de acoplamento do equipamento a dispositivos coletores de dados (TOMMASELLI, 2001), a precisão nas medidas, a possibilidade das medidas serem coletadas tanto vertical quanto horizontalmente no perfil do solo (SOUZA et al., 2001b), a facilidade de operação (SERRARENS et al., 2000) e a segurança ao operador (TOPP et al., 1980). Entretanto, apresenta como desvantagens a dependência do tipo de solo (mineral ou orgânico), do teor de materiais magnéticos do solo, a calibração trabalhosa, o custo elevado (TOMMASELLI, 1997), a influência dos óxidos de ferro e da densidade do solo sobre as medidas (SOUZA et al., 2001b).

Além da calibração fornecida pelo fabricante do equipamento, outras calibrações foram realizadas, sendo a mais citada a de Topp et al. (1980). Tommaselli (1997), avaliando este modelo, recomenda que o mesmo seja preterido para as determinações de K_a com maior precisão. O autor obteve em seu trabalho equações para 5 solos distintos e também para o conjunto de todos eles, apresentando modelos empíricos, semi-empíricos e físicos de calibração para os solos estudados. Tommaselli & Bacchi (1996) afirmam que os modelos empíricos devem ser aplicados para cada tipo de solo. Estes autores ajustaram modelos polinomiais cúbicos e efetuaram uma análise de regressão para avaliar a significância de cada termo da equação polinomial e a importância de outros parâmetros do solo, tais como densidade do solo e porosidade sobre a calibração do TDR, através do procedimento de seleção "stepwise" com restrição por C de Mallows. Pode ser citado ainda o modelo exponencial obtido por

Coelho et al. (2001). Estes autores concluem em seu trabalho que K_a não é afetada nem pelo tipo de solo nem pela estrutura, deformada ou indeformada. Diversos autores nacionais apresentam resultados de calibração de equipamentos TDR para latossolos: Souza et al. (2001a), Minella et al. (1999), Santos et al. (2002). Trintinalha (2000) avaliou a influência da compactação do solo sobre as leituras de um equipamento de TDR e concluiu que a densidade do solo exerce influência sobre a leitura do aparelho e que, portanto, o modelo de calibração deve incluir a variável densidade do solo. Cichota & Lier (2002) avaliaram no campo o desempenho de um equipamento TDR com guias segmentadas e testaram a utilização de tensiômetros na calibração. Foram ajustados modelos lineares para cada segmento de cada sonda, para cada segmento de todas as sondas e para todos os dados. Existem diversos modelos obtidos e cada um oferece sua contribuição no intuito de se obter uma calibração ideal ou particular, para cada tipo de solo.

O objetivo deste trabalho foi calibrar um equipamento TDR em condições de campo, especificamente para um Latossolo Vermelho distroférico.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Região Oeste do Paraná, no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola (NEEA), pertencente à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel. O solo da região foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico típico (EMBRAPA, 1999).

Um círculo com 2,0 metros de raio foi marcado na parte central de uma área de 5,0 x 5,0 m, sendo protegido com armação de folha metálica e coberto com lona plástica, para não permitir infiltração de água de eventuais chuvas. Um canal ao redor da área também foi feito para não permitir a entrada de água.

Com o objetivo de promover a variação dos teores de água no solo, a área foi inundada, sendo mantido o nível médio da água cinco centímetros acima do solo. No total foram

realizadas 27 coletas de dados, desde o momento em que a água infiltrou no solo até o momento em que as medidas de umidade se tornaram constantes. Em cada coleta foram obtidas a constante dielétrica aparente (K_a) e a umidade volumétrica (θ) com o equipamento TDR. No mesmo instante, foram retiradas, para a determinação da umidade volumétrica, quatro amostras deformadas de solo, uma em cada região do círculo. As amostras foram retiradas deformadas, pois não havia espaço disponível para retirada de um grande número de amostras indeformadas. No primeiro dia, logo após a água ser absorvida pelo solo, foram realizadas quatro coletas: a primeira imediatamente após a infiltração da água, a segunda 10 minutos depois e as outras duas em intervalos de 15 minutos. Em seguida, foram realizadas quatro coletas em intervalos de 30 minutos. No dia seguinte, foram realizadas somente duas coletas (uma pela manhã e outra à tarde) e nos três dias seguintes foram realizadas coletas diárias. Foram realizadas na sequência mais 10 coletas em intervalos de um, dois, três ou quatro dias, três leituras com intervalos de, aproximadamente, uma semana, sendo realizada a última coleta de dados 30 dias após. As medidas de umidade volumétrica foram obtidas tanto pelo equipamento TDR, com o emprego da sonda original de 20 cm, como pelo método gravimétrico (EMBRAPA, 1997). Foram coletadas 12 amostras indeformadas de solo para se determinar a densidade média do solo, sendo oito na camada 15 - 20 cm e quatro na camada 5 - 10 cm. Em todas as amostras coletadas as determinações de densidade do solo e umidade gravimétrica foram feitas segundo Embrapa (1997), sendo a umidade volumétrica obtida pelo produto da umidade gravimétrica pela densidade do solo.

Para a calibração do equipamento TDR foram realizados ajustes de curva, sendo empregadas planilhas eletrônicas. Foram testados os modelos: cúbico, quadrático, linear, exponencial, potência e logaritmo, para se avaliar qual melhor se ajustou aos dados. A análise de variância e o teste de importância das variáveis foram realizados para o modelo que apresentou o melhor ajuste.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As umidades volumétricas obtidas pelo método gravimétrico variaram de 0,366 a 0,489 m^3m^{-3} e os valores observados apresentaram distribuição normal, segundo Teste de Normalidade Anderson-Darling. Na Figura 1 é apresentada a dispersão da constante dielétrica aparente versus umidade volumétrica medida pelo método gravimétrico.

No Quadro 1 apresentam-se os modelos ajustados e os respectivos coeficientes de determinação (R^2). O modelo que melhor se ajustou aos dados foi o polinomial cúbico, porém, o modelo polinomial quadrático também apresentou um bom ajuste dos dados.

Na análise de variância foi rejeitada a hipótese nula, portanto, pelo menos uma das variáveis explicativas afetou a variável resposta. (Quadro 4 – modelo A)

Quadro 1. Modelos ajustados aos dados obtidos em condições de campo.

Modelo	R^2
$\theta = 0,0075Ka + 0,1834$	0,861
$\theta = 0,2248 \ln(Ka) - 0,3526$	0,833
$\theta = 0,0662Ka^{0,5365}$	0,848
$\theta = 0,2382e^{0,0179Ka}$	0,874
$\theta = 0,0006Ka^2 - 0,0299Ka + 0,7471$	0,925
$\theta = 0,00001Ka^3 - 0,0005Ka^2 + 0,0033Ka + 0,4166$	0,925

O Quadro 2 mostra a importância das variáveis para o modelo, indicando que nenhum dos termos é significativo ao nível de 5% de significância. Por este motivo, utilizou-se o procedimento “Stepwise” para verificar qual conjunto de variáveis melhor explica o modelo.

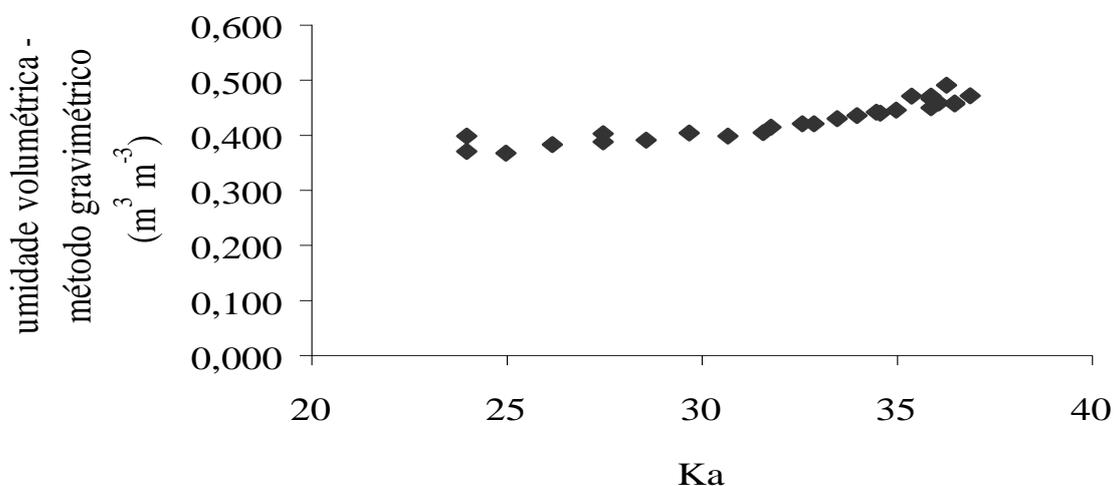


Figura 1. Dispersão dos valores da constante dielétrica obtida pelo equipamento TDR versus umidade volumétrica obtida pelo método gravimétrico.

Quadro 2. Teste de importância das variáveis do modelo polinomial cúbico.

Estimadores	Coefficiente	Desvio-padrão	Estatística t_0	p-valor	Decisão
Constante	0.4166	1.151	0.36	0.721	N.S.
Ka	0.0033	0.1151	0.03	0.977	N.S.
Ka^2	-0.000489	0.003801	-0.13	0.899	N.S.
Ka^3	0.00001198	0.00004143	0.29	0.775	N.S.

N.S. – Não significativa a 5% de probabilidade

O primeiro modelo sugerido foi um modelo polinomial cúbico sem o termo linear: $\theta = 0.00001079 K_a^3 - 0.0003805 K_a^2 + 0.44948$.

Foi utilizada a análise de variância para avaliar o modelo ajustado. Como $P < 0,05$, foi rejeitada a hipótese nula, portanto, pelo menos uma das variáveis explicativas afetou a variável resposta. (Quadro 4 – modelo B)

O Quadro 3 mostra a importância das variáveis para o modelo, indicando que todos os termos são significativos ao nível de 5% de significância. Porém, para valores de K_a entre 0 e 23,5 ($0 \leq K_a \leq 23,5$) este modelo é decrescente, não devendo ser utilizado.

Ajustou-se, então, o segundo modelo sugerido pelo procedimento “Stepwise”, um modelo polinomial cúbico sem os termos linear e quadrático: $\theta = 0.00000267 K_a^3 + 0.332394$.

Foi utilizada a análise de variância para avaliar o modelo ajustado. Como $P < 0,05$, foi rejeitada a hipótese nula, portanto, pelo menos uma das variáveis explicativas afetou a variável resposta. (Quadro 4 – modelo C).

O Quadro 5 mostra a importância das variáveis para o modelo, indicando que todos os termos são significativos ao nível de 5% de significância. Portanto, este deve ser o modelo adotado.

Na Figura 2 é apresentada a dispersão da constante dielétrica aparente versus umidade volumétrica obtida pelas 3 diferentes formas: através do modelo do fabricante, pelo modelo polinomial cúbico encontrado e pela equação de Topp.

Quadro 3. Teste de importância das variáveis do modelo polinomial cúbico sem o termo linear.

Estimadores	Coefficiente	Desvio-padrão	Estatística t_0	p-valor	Decisão
Constante	0.44948	0.04346	10.34	0.000	*
K_a^2	-0.0003805	0.0001400	-2.72	0.012	*
K_a^3	0.00001079	0.00000299	3.61	0.001	*

* - Significativa a 5% de probabilidade

Quadro 4. Resumo das análises de variância para os modelos cúbicos ajustados (A), sem o termo linear (B) e sem os termos linear e quadrático (C).

FV	MODELO AJUSTADO					
	A		B		C	
	GL	QM	GL	QM	GL	QM
Regressão	3	0,0092477	2	0,013872	1	0,027050
Resíduo	23	0,0000979	24	0,000094	25	0,000118
Total	26		26		26	

FV: Fonte de Variação

GL: Graus de Liberdade

QM: Quadrado médio

Quadro 5. Teste de importância das variáveis do modelo polinomial cúbico sem os termos linear e quadrático.

Estimadores	Coefficiente	Desvio-padrão	Estatística t_0	p-valor	Decisão
Constante	0.332394	0.006508	51.07	0.000	
K_a^3	0.00000267	0.00000018	15.16	0.000	

* - Significativa a 5% de probabilidade

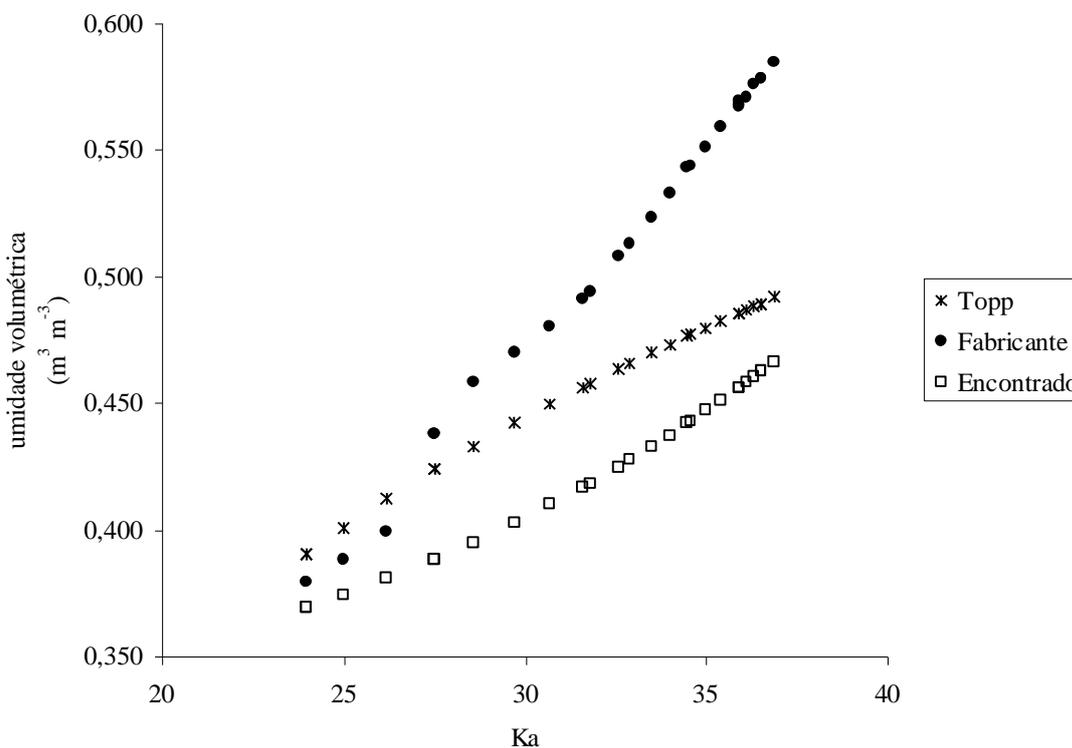


Figura 2. Dispersão dos valores da constante dielétrica versus umidade volumétrica.

6 CONCLUSÕES

Para a calibração em condições de campo o modelo polinomial cúbico $\theta = 0,332394 + 0,00000267 Ka^3$, sem os termos linear e quadrático, foi o que melhor se ajustou aos dados.

7 AGRADECIMENTOS

À Fundação Banco do Brasil, pelo apoio na aquisição do equipamento de TDR.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CICHOTA, R.; LIER, Q. J. V. Calibração no campo de um equipamento de TDR segmentado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. *Anais...*Cuiabá: SBSC/ UFMT, 2002. 1CD-ROM.

COELHO, E.F.; LOPES, L.C.; SOUZA, C.F. Modelos para obtenção da umidade em função da constante dielétrica de dois tipos de solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. *Anais...*Foz do Iguaçu: SBEA, 2001. 1CD-ROM.

COMEGNA, V.; COPPOLA, A.; SOMMELLA, A. Nonreactive solute transport in variously structured soil materials as determined by laboratory – based time domain

- reflectometry (TDR). **Geoderma**, Itália, v.92, p.167-184, 1999.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Serviço de Produção de Informação, 1999. 412 p.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.
- MINELLA, J.P.G. et al. Calibração do TDR para um latossolo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28.,1999, Pelotas. **Anais...**Pelotas: SBEA, 1999. 1CD-ROM.
- NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, Washington, v.31, p.213-237, 2001.
- SANTOS, D. et al. Calibração da técnica TDR para a determinação do conteúdo de água em cinco latossolos dos Cerrados. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. **Anais...**Cuiabá: SBCS/UFMT, 2002. 1CD-ROM.
- SERRARENS, D. et al. Soil moisture calibration of TDR multilevel probes. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.57, n.2, p. 349-354, 2000.
- SOILMOISTURE EQUIPMENT CORPORATION. **6050X1 – Manual de Operación**. Santa Bárbara, 1998, 24 p.
- SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E.; TESTEZLAF, R. Experiência do Laboratório de Hidráulica, Irrigação e Drenagem da Faculdade de Engenharia Agrícola/ Unicamp no uso da técnica da TDR. In: MATSURA, E. E. et al. **Aplicações da técnica de TDR na Agricultura**. Campinas: UNICAMP/FEAGRI, 2001a. p.147-176.
- SOUZA, C. F.et al. Construção de sondas de TDR para a irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais....** Foz do Iguaçu: SBEA, 2001b. 1CD – ROM.
- TOMMASELLI, J. T. G. Critérios para calibração de sondas de TDR. In: MATSURA, E. E. et al. **Aplicações da técnica de TDR na Agricultura**. Campinas: UNICAMP/FEAGRI, 2001. p.85-114.
- TOMMASELLI, J.T.G.; BACCHI, O.O.S. **Calibração de um equipamento TDR utilizando modelos empíricos para cinco solos paulistas**. In: XIII CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 1996, Águas de Lindóia. **Anais...** Águas de Lindóia: SBCS, 1996. 1CD-ROM.
- TOMMASELLI, J. T. G. **Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (Time - Domain Reflectometry)**. 1997. 109 f. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.
- 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, p.574-582, 1980.
- TRINTINALHA, M.A. **Avaliação da técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) na determinação de umidade em Nitossolo Vermelho Eutroférico**. 2000. 64 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2000.