



Desenvolvimento e calibração de guias de onda para TDR



Camilo de L. T. de Andrade¹, Édio L. da Costa² & Paulo E. P. de Albuquerque³

¹ Embrapa Milho e Sorgo, CP 151, CEP 35701-970, Sete Lagoas, MG. Fone: (31) 3779-1000, Fax: (31) 3779-1088. E-mail: camilo@cnpms.embrapa.br (Foto)

² EPAMIG. CP 12, CEP 39440-000, Janaúba, MG. Telefax: (38) 821-2160. E-mail: epamig@al.connect.com.br

³ Embrapa Milho e Sorgo

Protocolo 114 - 8/8/2002 - Aprovado em 3/2/2003

Resumo: A medição da umidade do solo é crucial para a pesquisa e o manejo de irrigação. Entre os métodos mais recentes de determinação da umidade está o da reflectometria no domínio do tempo (TDR) que se baseia na correlação entre a capacidade dielétrica do solo e a sua umidade. A obtenção do perfil de umidade do solo requer a utilização de um grande número de guias de onda, cujo custo ainda é elevado. Por outro lado, as curvas de calibração relacionando umidade com a capacidade dielétrica do solo foram desenvolvidas para outros meios porosos, solos desestruturados e solos de países com clima temperado. O objetivo deste trabalho foi construir uma guia de onda com materiais facilmente encontrados no mercado nacional e calibrá-la para solos tropicais. As curvas de calibração para o Neossolo quartzarênico e Latossolo Vermelho são distintas e diferentes dos modelos apresentados na literatura. A modificação de um modelo matemático, fisicamente embasado, permitiu a geração de curvas de calibração com ajuste adequado, porém independentes para cada tipo de solo.

Palavras-chave: instrumentação, umidade do solo, irrigação

Development and calibration of TDR wave guides

Abstract: Soil-water content measurement is critical for irrigation research and management. Time domain reflectometry (TDR) is among the newly developed methods for determination of soil-water content which relies on the relation between the soil dielectric property and water content. In order to obtain a soil water content profile, a large number of wave guides are necessary which raises the cost. On the other hand, calibration curves relating dielectric capacity to soil-water content have been developed mainly for soils of temperate regions. The objectives of this work were the development of a buriable wave guide using available materials and its calibration for tropical soils. Calibration curves developed for Psament and Haplustox soils are distinct and different from those found in the literature. A modification of a physically-based mathematical model fits well to the data of each soil type independently.

Key words: instrumentation, water content, irrigation

INTRODUÇÃO

A medição do potencial da água e da umidade do solo é essencial para a pesquisa e para o manejo racional da irrigação. Entre os métodos de medição da umidade do solo desenvolvidos recentemente está o da reflectometria no domínio do tempo (TDR), cujo princípio de funcionamento se baseia na relação existente entre a propriedade dielétrica (permissividade) e a umidade do solo. Uma descrição detalhada do princípio de funcionamento desse tipo de equipamento é apresentada na literatura (Soilmoisture, 1990; Or & Wraith, 1997).

A relação entre a umidade e a capacidade dielétrica de um solo mineral é descrita por uma equação empírica desenvolvida por Topp et al. (1980):

$$\theta = -5,310^{-2} + 2,9210^{-2} \epsilon_b - 5,510^{-4} \epsilon_b^2 + 4,310^{-6} \epsilon_b^3 \quad (1)$$

em que θ é a umidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e ϵ_b é a capacidade dielétrica (adimensional) do meio poroso, que engloba sólidos, água e ar. Os coeficientes da Eq. 1 são empíricos, ajustados para meios porosos artificiais e solos minerais de países temperados, numa faixa de umidade de 0 a $0,5 \text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Nos anos 90, outro modelo fisicamente embasado foi proposto por Roth et al. (1990):

$$\theta = \frac{\epsilon_b^\beta - (1-n)\epsilon_s^\beta - n\epsilon_a^\beta}{\epsilon_w^\beta - \epsilon_a^\beta} \quad (2)$$

em que ϵ_s , ϵ_a , ϵ_w são, respectivamente, as capacidades dielétricas da fase sólida, gasosa e líquida do solo, n é a porosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e β é um parâmetro adimensional relacionado com a geometria do meio poroso. A capacidade dielétrica da fase sólida do solo, da água e do ar, é conhecida e alguns autores têm recomendado o valor de 0,5 para o parâmetro β .

O desempenho desse tipo de equipamento e a aplicabilidade das equações recomendadas pelo fabricante, e descritas na literatura vêm sendo avaliados em condições tropicais (Conciani et al., 1997; Pessoa & Moraes, 1997; Silva, 1998; Pessoa et al., 2000; Souza et al., 2000; Coelho et al., 2001; Tommaselli & Bachi, 2001). Os estudos demonstraram que o equipamento se presta para o monitoramento da umidade (Conciani et al., 1997; Pessoa & Moraes, 1997; Silva, 1998; Souza et al., 2000; Tommaselli & Bachi, 2001) ou do potencial da água no perfil do solo (Pessoa et al., 2000). Todavia, as equações recomendadas não são adequadas para alguns solos do Brasil, necessitando de calibrações locais, e mesmo individuais, para cada tipo de solo (Silva, 1998; Coelho et al., 2001; Tommaselli & Bachi, 2001).

O efeito de propriedades como textura, densidade, teor de matéria orgânica, composição mineral e, também, da temperatura nas propriedades dielétricas do solo foi estudado por vários autores (Dasberg & Hopmans, 1992; Persson & Berndtsson, 1998; Jacobsen & Schjonning, 1993; Halm et al., 1999; Ponizovsky et al., 1999; Tomer et al., 1999; Coelho et al., 2001; Seyfried & Murdock, 2001; Tommaselli & Bachi, 2001).

Há, basicamente, três tipos de guia de onda que podem ser empregados para monitorar a umidade do solo: 1) de duas hastas grossas, cuja conexão com o cabo não é fixa, permitindo que se instalem hastas em vários pontos e se utilize a mesma conexão para leitura em vários locais (Soilmoisture, 1990); 2) de três ou duas hastas finas, cuja conexão com o cabo é permanente, podendo ser enterrada na profundidade desejada do perfil do solo (Soilmoisture, 1990); 3) de haste segmentada, que é inserida verticalmente no perfil do solo (Conciani et al., 1997; Pessoa & Moraes, 1997; Souza et al., 2000). O primeiro tipo é empregado para monitorar a umidade na superfície, enquanto os dois últimos se prestam para monitorar a umidade no perfil do solo. Devido ao custo elevado para o monitoramento em várias profundidades e em diversos pontos, guias de onda estão sendo confeccionadas localmente, empregando-se materiais de fácil obtenção (Cassel et al., 1994; Conciani et al., 1997; Souza et al., 2000; Coelho et al., 2001). Há, portanto, a necessidade de se produzir, a custo mais baixo, guias de onda para o monitoramento da umidade no perfil do solo.

Este trabalho teve como objetivo confeccionar, com materiais nacionais, e calibrar uma guia de onda para a TDR, modelo TRASE, fabricada pela Soil Moisture¹.

MATERIAL E MÉTODOS

A calibração foi feita em campo, em um Latossolo Vermelho de Sete Lagoas, MG, e em um Neossolo quartzarênico do Projeto Jaíba, MG, cujas características são apresentadas na Tabela 1. Utilizou-se no estudo um equipamento TDR, modelo TRASE, pertencente à EPAMIG (Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado de Minas Gerais).

Guias de onda de três hastas paralelas, espaçadas entre si 1,5 cm e com 15 cm de comprimento, foram confeccionadas no Laboratório de Física do Solo da EMBRAPA Milho e Sorgo, empregando-se materiais nacionais. As hastas da guia foram construídas utilizando-se varetas de solda para aço inoxidável, tipo 308L, diâmetro de 3,25 mm. Um cabo coaxial do tipo RG-58, 50 ohms, flexível, foi utilizado para conectar a guia de onda ao equipamento. Em uma de suas extremidades, foi fixado, por pressão, um conector tipo BNC. A parte externa do cabo coaxial foi dividida para conectar-se nas duas hastas externas e a parte interna foi soldada à haste central da guia. Um capacitor de 3,9 pF, soldado entre duas das três hastas, foi necessário para marcar, eletronicamente, o início da guia de onda. O algoritmo interno da TDR necessita de um pico no início e de uma elevação no final da curva de voltagem versus tempo, para separar a guia de onda propriamente dita do restante do cabo (Soilmoisture, 1990). A função do capacitor foi gerar o pico no início da onda, sem o qual o algoritmo não consegue calcular corretamente a capacidade dielétrica do meio. Para manter as hastas separadas de uma distância fixa sobre a conexão hastas-cabo, fundiu-se um bloco de resina de poliéster tipo T-208, com respectivo catalisador (Figura 1).

A calibração foi feita em campo, instalando-se guias de onda na posição horizontal, nas profundidades de 20 e 40 cm valendo-se, para isto, de pequenas trincheiras abertas minutos antes. Na seqüência, leituras foram feitas com a TDR e, logo em seguida, amostras de solo não-deformado foram retiradas em cada profundidade, para determinação da umidade pelo método gravimétrico. Leituras e amostragens foram realizadas em diversas condições de umidade do solo.

¹ Referência à marca registrada não constitui endosso por parte dos autores e instituições envolvidas no trabalho

Tabela 1. Características físico-hídricas e concentração de matéria orgânica para os solos estudados

Prof. cm	Densidade		Capacidade de Campo	Ponto de Murcha Permanente	Porosidade Total	Composição Granulométrica				Matéria Orgânica g g^{-1}
	Partículas	Solo				Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	
	Mg m^{-3}			$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$		g kg^{-1}				
Latossolo Vermelho										
0-10	2,56	0,87	0,346	0,234	0,658	50	30	390	530	42
10-26	2,56	1,08	0,413	0,298	0,579	50	30	240	680	34
26-49	2,53	0,95	0,385	0,278	0,623	50	40	180	730	31
Neossolo quartzarênico										
0-10	2,61	1,46	0,089	0,050	0,438	583	306	12	99	6
10-30	2,63	1,54	0,090	0,051	0,416	579	324	7	90	4
30-50	2,60	1,48	0,113	0,064	0,429	499	379	12	110	2



Figura 1. Detalhe do capacitor soldado entre duas hastes e do conector da guia de onda

Os modelos de Topp et al. (1980) e de Roth et al. (1990) foram testados para descrever a relação entre umidade e capacidade dielétrica do solo. O modelo de Roth et al. (1990) foi também modificado, incluindo nele uma constante, α , e permitindo o ajuste do parâmetro β :

$$\theta = \alpha + \frac{\epsilon_b^\beta - (1-n)\epsilon_s^\beta - n\epsilon_a^\beta}{\epsilon_w^\beta - \epsilon_a^\beta} \quad (3)$$

Ferramentas de ajuste de modelos não-lineares de planilhas eletrônicas foram empregadas na determinação dos parâmetros α e β .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dados de umidade versus capacidade dielétrica, para os dois tipos de solo, bem como as curvas de calibração para as guias-de-onda, são apresentados na Figura 2. Nota-se que os valores de umidade e de capacidade dielétrica são muito distintos para os dois solos, contrariando o conceito de calibração universal preconizado pelo fabricante da TDR (Soilmoisture, 1990) e também discutido na literatura (Roth et al., 1992; Coelho et al., 2001; Tommaselli & Bachi, 2001). Valores de capacidade dielétrica entre 2,5 e 7,5 correspondem a valores muito menores de umidade no Neossolo, que no Latossolo. O efeito da textura na estimativa da umidade com TDR foi também observado por outros pesquisadores (Dasberg & Hopmans, 1992; Jacobsen & Schjonning, 1993; Tommaselli & Bachi, 2001; Ponizovsky et al., 1999; Tomer et al., 1999; Seyfried & Murdock, 2001).

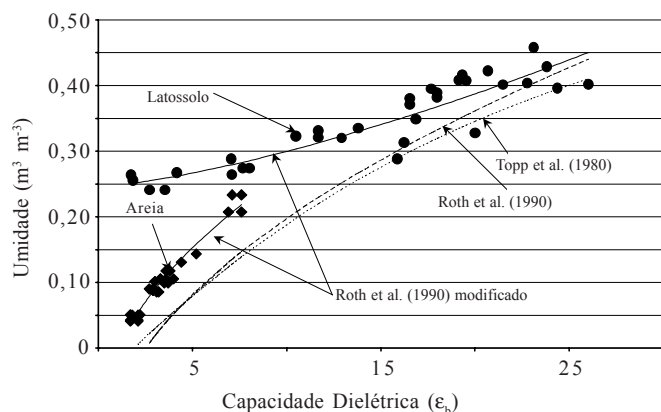


Figura 2. Umidade do solo em função da capacidade dielétrica para dois tipos de solo e curvas de calibração para guias-de-onda confeccionadas em laboratório

Os modelos de Topp et al. (1980) e de Roth et al. (1990) subestimaram a umidade nos dois tipos de solo, conforme também observaram outros autores (Gervasio & Silva, 1999; Tomer et al., 1999; Tommaselli & Bachi, 2001). Em estudos realizados em materiais de solo com textura diferente, verificou-se que a relação entre a capacidade dielétrica e a umidade do solo é melhor descrita com modelos exponenciais (Coelho et al., 2001) ou polinomiais (Tommaselli & Bachi, 2001). No Latossolo, as diferenças são maiores na faixa de baixa umidade, na qual a capacidade dielétrica da fase líquida não é predominante. Pode estar havendo interferência dos óxidos de ferro e de alumínio na capacidade dielétrica dos solos tropicais, o que requer estudos mais aprofundados. Em trabalho realizado por Halm et al. (1999), a adição de 6% em peso de magnetita na areia lavada aumentou consideravelmente as leituras da umidade do solo, obtidas com TDR.

O modelo de Roth et al. (1990) modificado (Eq. 3) foi adequado para ambos os solos (Figura 2 e Tabela 2), porém com parâmetros de ajuste diferentes para cada um dos solos estudados.

Tabela 2. Parâmetros do modelo de Roth original (Roth et al., 1990) e modificado, ajustados para os dados de umidade versus capacidade dielétrica para os solos estudados

Parâmetros	Roth-Modificado		Roth-Original
	Neossolo Quartzarênico	Latossolo Vermelho	
β	0,4960	1,4020	0,5000
α	0,0707	0,2533	0,0000
n	0,4190	0,6170	0,4190
Soma Quadrado Desvios	0,0033	0,0221	
Variância	0,0028	0,0033	
Número de Pontos	29	33	
R ²	0,9590	0,7981	

O valor de β para o Neossolo é praticamente igual ao proposto por Roth et al. (1990) para um meio poroso isotrópico; entretanto, o valor de $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, da constante α ajustada, desloca a curva para cima. No caso do Latossolo, o valor de β é ainda maior, estando fora dos limites de -1 e 1, definidos por Roth et al. (1990).

Os valores da constante α para ambos os solos estão próximos de valores médios da umidade do solo no ponto de murcha permanente (-1500 kPa). Uma abordagem semelhante com que se tentou associar o termo independente de um modelo polinomial, com outras propriedades do solo já foi explorada por Tommaselli & Bachi (2001). Este fato é importante no aprofundamento dos estudos visando a uma equação generalizada para solos minerais. A inclusão, no modelo, de outros parâmetros relacionados à textura, porosidade, densidade e matéria orgânica, já foi experimentada em outros trabalhos (Jacobsen & Schjonning, 1993; Ponizovsky et al., 1999; Tommaselli & Bachi, 2001).

CONCLUSÕES

1. A confecção de guias de onda para TDR modelo TRASE, utilizando-se materiais nacionais, foi possível, o que possibilita

ampliar a utilização desse equipamento em pesquisa e manejo de irrigação.

2. O comportamento da relação entre umidade e capacidade dielétrica do solo foi diferente para Neossolo quartzarênico e Latossolo Vermelho e requereu curvas de calibração distintas.

3. Os modelos existentes na literatura não descrevem corretamente essa relação para os solos estudados.

4. A modificação do modelo de Roth original permitiu o ajuste de curvas de calibração separadas para cada um dos solos.

LITERATURA CITADA

- Cassel, D.K.; Kachanoski, R.G.; Topp, G.C. Practical considerations for using TDR cable tester. *Soil Technology*, Cremlingen-Destedt, v.7, n.2, p.113-126, 1994.
- Coelho, E.F.; Andrade, C.L.T.; Or, D.; Lopes, L.C.; Souza, C.F. Desempenho de diferentes guias de ondas para uso com o analisador de umidade TRASE. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande v.5, n.1, p.81-87, 2001.
- Conciani, W.; Carneiro, B.J.; Soares, M.M.; Herrmann, P.S.P.; Crestana, S. Emprego de TDR com sondas multiastes segmentadas para medida de umidade de um perfil de solo. In: *Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária*, 1, 1996, São Carlos, Anais... Brasília: EMBRAPA-SPI, 1997. p.169-179.
- Dasberg, S.; Hopmans, W. Time domain reflectometry calibration for uniformly and non uniformly wetted sandy and clayey loam soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.56, p.1341-1345, 1992.
- Gervasio, E.S.; Silva, E.L. Uso do instrumento TDR para determinação do teor de água em diferentes camadas de um Latossolo Roxo distrófico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.3, n.3, p.417-420, 1999.
- Halm, D.; Gaiser, T.; Stahr, K. Does magnetite have an influence on measurements of water contents by time domain reflectometry (TDR). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Weinheim, v.162, n.6, p.661-665, 1999.
- Jacobsen, O.H.; Schjonning, P. A. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.151, p.147-157, 1993.
- Or, D.; Wraith, J.M. *Agricultural and environmental soil physics*. Logan: Utah State University, 1997. 218p.
- Persson, M.; Berndtsson, R. Texture and electrical conductivity effects on temperature dependency in time domain reflectometry. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.62, n.4, p.887-893, 1998.
- Pessoa, J.D.C.; Kanno, S.S.; Carneiro, B.J.I.; Moraes, J.A.P.V. Avaliação da técnica de TDR para medida do potencial de sucção em um solo sob vegetação de cerrado. In: *Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária*, 2, 1998, São Carlos, Anais... São Carlos: EMBRAPA, 2000. p.341-345.
- Pessoa, J.D.C.; Moraes, J.A.P.V. Acompanhamento da umidade de um solo de cerrado com a técnica de TDR durante a transição entre as estações seca e chuvosa. In: *Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, 26, 1997, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. p.28-31. CD-Rom
- Ponizovsky, A.A.; Chudinova, S.M.; Pachepsky, Y.A. Performance of TDR calibration models as affected by soil texture. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.218, p.35-42, 1999.
- Roth, C.H.; Malicki, M.A.; Plagge, R. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibration soil moisture measurements by TDR. *Journal of Soil Science*, Reading, v.43, n.1, p.1-13, 1992.
- Roth, K.; Shulin, R.; Fluhler, H.; Attinger, W. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using composite dielectric approach. *Water Resources Research*, Washington, v.26, n.10, p.2267-2273, 1990.
- Seyfried, M.S.; Murdock, M.D. Response of a new soil water sensor to variable soil, water content and temperature. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.65, n.1, p.28-34, 2001.
- Silva, E.L. Determinação automática do teor de água em Latossolo Roxo distrófico com uso de reflectometria de onda. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, 27, 1998, Poços de Caldas, Anais... Lavras:UFLA/SBEA, 1998. p.154-156.
- Soilmoisture Equipment Corp. TRASE operating instructions. Goleta, CA: Soilmoisture Equipment Corp., 1990. 110p.
- Souza, C.F.; Matsura, E.E.; Testezlaf, R. Utilização de um equipamento TDR (Trase System I) com sonda multihaste segmentada para medir a umidade do solo. In: *Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária*, 2, 1998, São Carlos, Anais... São Carlos: EMBRAPA, 2000. p.161-169.
- Tomer, M.D.; Clothier, B.E.; Vogeler, I.; Green, S.A. dielectric-water content relationship for sandy volcanic soils in New Zealand. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.63, n.4, p.777-781, 1999.
- Tommaselli, J.T.G.; Bachi, O.O.S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.36, n.9, p.1145-1154, 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, p.574-582, 1980.