

# INFLUÊNCIA DO TIPO DE AMOSTRAGEM NA CONSTANTE DIELÉTRICA DO SOLO E NA CALIBRAÇÃO DE SONDAS DE TDR<sup>(1)</sup>

Marcelo Rocha dos Santos<sup>(2)</sup>, João Henrique Zonta<sup>(3)</sup> &  
Mauro Aparecido Martinez<sup>(4)</sup>

## RESUMO

A técnica da TDR é uma importante ferramenta para o estudo do teor de água no solo. Para o correto emprego dessa técnica, é necessário calibrar modelos que relacionam o conteúdo volumétrico de água no solo com a constante dielétrica deste, considerando as características de cada solo. Assim, objetivou-se avaliar a influência do tipo de solo e da forma de amostragem (amostra deformada e não deformada) na constante dielétrica ( $K_a$ ) do solo e no desempenho de modelos para a estimativa do conteúdo volumétrico de água no solo ( $\theta$ ), usando a técnica TDR. Os solos utilizados foram um Cambissolo Háplico Tb distrófico (CX), um Latossolo Vermelho ácrico típico (LV) e um Neossolo Quartzarênico (RQ), que apresentam diferenças quanto à textura. As amostras de solo referentes a CX e LV foram coletadas com estruturas deformadas e não deformadas, e as de RQ, apenas deformadas, devido à baixa agregação deste. A calibração foi realizada com sondas compostas de três hastes com 0,10 m de comprimento efetivo e 0,05 m de resina, com espaçamento entre hastes de 0,017 m e sem resistor na haste central, conectadas a um equipamento TDR 100 da Campbell Cientific. Os valores de  $K_a$ , para um mesmo valor de  $\theta$ , foram alterados somente pela variação do tipo de solo, não sendo influenciados pelo tipo de amostragem do solo (deformada e não deformada). Em relação aos modelos testados para estimativa de  $\theta$  em função de  $K_a$ , o polinomial cúbico foi o que apresentou melhor ajuste aos dados de  $\theta$  determinados por gravimetria para o Neossolo Quartzarênico e para o Cambissolo Háplico, enquanto para o Latossolo Vermelho um modelo linear apresentou melhor ajuste.

**Termos de indexação:** reflectometria, teor de água, textura do solo.

---

<sup>(1)</sup> Recebido para publicação em abril de 2009 e aprovado em janeiro de 2010.

<sup>(2)</sup> Doutorando do Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa – UFV. CEP 36570-000 Viçosa (MG).  
E-mail: marrochas@yahoo.com.br

<sup>(3)</sup> Doutorando do Departamento de Engenharia Agrícola, UFV. E-mail: joaozonta@hotmail.com

<sup>(4)</sup> Professor Titular, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV. E-mail: mmauro@ufv.br

## SUMMARY: INFLUENCE OF SAMPLING TYPE ON THE DIELECTRIC CONSTANT AND CALIBRATION OF TDR PROBES

*The technique of TDR (time-domain reflectometry) is an important tool for the study of soil water content. For a correct use of this technique, models that relate the volumetric water content in soil with the soil dielectric constant must be calibrated, considering the characteristics of each soil. The purpose of this study was to evaluate the influence of soil type and sampling form (disturbed and undisturbed samples) on the dielectric constant ( $K_a$ ) of the soil and the performance of models to estimate the volumetric water content in soil ( $\theta$ ) by TDR. The soils were a Haplic Cambisol, an Oxisol and a Typic Quartzipsamment, with different textures. Disturbed and undisturbed Haplic Cambisol and Oxisol samples were collected, but only disturbed Typic Quartzipsamment samples, due to its low aggregation. Calibration was performed with probes consisting of three rods (effective length 0.10 m and resin length 0.05 m), spaced 0.017 apart and without resistor on the center rod, connected to a TDR 100 (Campbell Scientific) equipment. The  $K_a$  values, for a same  $\theta$  value, were affected by variation of the soil type, but not influenced by the type of soil sampling (disturbed or undisturbed). For the models tested to estimate  $\theta$  as a function of  $K_a$ , the cubic polynomial model fit the  $\theta$  data determined by gravimetry best for the Typic Quartzipsamment and Haplic Cambisol, whereas for the Oxisol a linear model fit better.*

*Index terms: reflectometry, water content, soil texture.*

## INTRODUÇÃO

O conteúdo de água no solo expressa a quantidade de água em massa ou volume contida no solo em um dado momento. O conhecimento desse valor no perfil do solo é indispensável para estudos hidrológicos e manejo da irrigação em áreas cultivadas. Entre os vários métodos de determinação do conteúdo de água no solo, a técnica TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) destaca-se por ser um método exato, não destrutivo, portátil e de fácil manuseio (Topp et al., 1980; Or & Wraite, 1997; Coelho et al., 2006). Tommaselli (1997) relata que uma das características mais atrativas da TDR é sua habilidade de monitorar, contínua e simultaneamente, o conteúdo volumétrico de água no solo em vários locais. É de fácil acoplamento a dispositivos coletores de dados (Tommaselli, 2001), permitindo monitorar o avanço da frente de umedecimento (Cecílio et al., 2003) e a redistribuição de água no perfil do solo (Teixeira et al., 2005). Topp et al. (1980) e Or & Wraith (1997) ressaltam que essa técnica destaca-se de outras pela sua exatidão e possibilidade de multiplicação de leituras e repetição sem destruição da amostra de solo.

A TDR apresenta como desvantagens: o pouco conhecimento sobre o seu comportamento em solos tropicais, por ser um método ainda pouco estudado nestes solos; a dependência do teor de materiais magnéticos e tipo de solo (mineral ou orgânico); a calibração trabalhosa; a influência dos óxidos de Fe e da massa específica do solo sobre as medidas (Souza et al., 2001); e o alto custo de aquisição.

Pela técnica TDR, o conteúdo de água no solo é determinado a partir dos valores da constante dielétrica do solo, correlacionados aos dados de conteúdo de água por meio de curvas de calibração obtidas a partir dos dados de campo ou laboratório. Os baixos valores da constante dielétrica do ar ( $K_{a_a} = 1$ ) e da matriz sólida ( $K_{a_s} = 3$ ), comparados ao da água ( $K_{a_w} = 80$ ), tornam o método pouco sensível à textura e estrutura do solo (Or & Wraith, 1997).

Para o uso da TDR são necessárias calibrações para diferentes tipos de solo, a fim de que se obtenha o valor correto do conteúdo volumétrico de água. De acordo com Pereira et al. (2006), essa é a grande dificuldade para a utilização do método, pois atualmente não há um método de calibração considerado padrão. São diversos os métodos de calibração citados na literatura. Villwock et al. (2004) propõe um método de calibração em campo para um Latossolo Vermelho distroférico, enquanto Coelho et al. (2006) e Vaz et al. (2004) apresentam propostas de métodos e ajustes de equações de calibrações para diferentes tipos de solos em condições de laboratório com uso de amostras deformadas.

Roth et al. (1992) mostraram que são necessárias calibrações diferentes para solos com minerais ferrosos ou orgânicos. Segundo Robinson et al. (1994), a presença de óxido de Fe e minerais de óxido de Ti influencia a determinação da constante dielétrica por meio da tecnologia TDR e a subsequente estimação do conteúdo de água. Lacerda et al. (2005) afirmam que o método TDR, com uso da equação de Topp et al. (1980), subestimou os valores do conteúdo de água em

um solo argiloso, demonstrando a necessidade de calibração do equipamento para uso no referido solo.

Os modelos de calibração da TDR podem ser de natureza empírica (Topp et al., 1980) ou física, que envolvem modelos dielétricos mistos (Tommaselli, 2001). Nesses,  $K_a$  é fragmentada em seus componentes da matriz do solo, da água e do ar. Dos modelos físicos disponíveis, destaca-se o de Roth et al. (1990). Os modelos de Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986) têm sido muito utilizados, estando inseridos nos equipamentos de TDR dos fabricantes, porém são de caráter empírico e não levam em consideração os efeitos dos componentes da  $K_a$  e das propriedades físicas do solo, razão pela qual podem não ser os mais adequados.

Villwock (2004) afirma que a calibração é exigida especialmente quando se trabalha com Latossolos, devido a algumas particularidades, como, por exemplo, os altos teores de Fe e argila e a expansibilidade do solo. Coelho et al. (2006) ressaltam que os modelos de calibração variam conforme o tipo de solo e que um modelo polinomial de terceiro grau pode ser calibrado com exatidão para cada situação de solo. Entretanto, a fixação dos coeficientes do modelo, como para o caso do modelo de Topp et al. (1980), pode não resultar em estimativas precisas do conteúdo volumétrico de água no solo. Silva & Gervásio (1999) encontraram uma subestimativa dos valores do conteúdo volumétrico de água para um Latossolo roxo textura argilosa com uso do modelo de Topp et al. (1980).

Alguns métodos propostos para calibração de sensores de TDR trabalham com o acondicionamento de amostras deformadas em recipientes, possibilitando a secagem mais acelerada do solo, como é o caso do método proposto por Cecílio et al. (2004). No entanto, quando são coletadas amostras deformadas, os constituintes minerais do solo são conservados, mas sua estrutura natural é alterada pelo processo de extração. Com o uso de amostras não deformadas, a estrutura natural do solo é preservada – fato interessante para a calibração do equipamento TDR, por se tratar de um método não destrutivo. Trintinalha (2000) avaliou a influência da compactação do solo sobre as leituras de um equipamento TDR e concluiu que a massa específica do solo exerce influência sobre

os valores de  $K_a$  lidos pelo aparelho e que, portanto, o modelo de calibração deve incluir a variável massa específica do solo.

Trabalhos relacionando a influência da estrutura na constante dielétrica do solo ainda são escassos na literatura. Coelho et al. (2001), trabalhando com amostras deformadas e não deformadas em dois solos de classe textural franco-arenoso-argiloso e argiloarenoso, concluíram que a constante dielétrica do solo não foi alterada pelas variações tanto do tipo de solo (textura) como de sua estrutura (deformada e não deformada). Vale ressaltar que as diferenças nas características físicas desses solos, no que diz respeito à porosidade, densidade e textura, não eram acentuadas. Portanto, a realização de mais trabalhos nesse contexto com solos de características físicas bem distintas é importante para melhores esclarecimentos sobre a real influência das características físicas na constante dielétrica.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho: avaliar o desempenho de modelos para estimativa do conteúdo volumétrico de água a partir da constante dielétrica do solo em diferentes tipos de solo e forma de amostragem (amostra deformada e não deformada); e avaliar a influência da textura e forma de amostragem na constante dielétrica para conteúdos de água entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa – UFV. Os solos utilizados foram: Cambissolo Háplico Tb distrófico (CX), coletado na região de Viçosa-MG; Latossolo Vermelho ácrico típico (LV), proveniente da região do Alto Paranaíba-MG; e Neossolo Quartzarênico (RQ), oriundo do município de Jaíba-MG. As amostras de solo referentes a CX e LV foram coletadas em amostras deformadas e não deformadas, e as de RQ, apenas em amostras deformadas, devido à baixa agregação deste (Quadro 1).

**Quadro 1. Análise granulométrica, classe textural e propriedades físicas de três classes de solo utilizadas na calibração das sondas de TDR**

Solo	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila <sup>(1)</sup>	Classe textural	CC <sup>(2)</sup>	PM <sup>(2)</sup>	$\rho$ <sup>(3)</sup>	$\epsilon$ <sup>(4)</sup>
	— dag kg <sup>-1</sup> —					— m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> —		kg dm <sup>-3</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
CX	20	20	7	53	Argila	0,37	0,21	1,40	0,46
LV	2	3	11	84	Muito argilosa	0,40	0,29	1,07	0,58
RQ	63	24	2	11	Muito arenosa	0,09	0,05	1,49	0,45

<sup>(1)</sup> Método da proveta. <sup>(2)</sup> CC: capacidade de campo e PM: ponto de murcha (Extrator de Richards). <sup>(3)</sup> Massa específica (Método do anel volumétrico). <sup>(4)</sup> Porosidade total; CX: Cambissolo Háplico Tb distrófico; LV: Latossolo Vermelho ácrico típico; e RQ: Neossolo Quartzarênico.

As amostras não deformadas foram coletadas em anéis de alumínio de 0,20 m de altura e 0,088 m de diâmetro, cravados no solo 0,12 m abaixo da superfície, sendo inseridos e retirados de forma a não compactar o solo dentro do anel. À medida que os anéis eram inseridos, retirava-se o solo ao redor dos anéis, minimizando a pressão do solo externo nas paredes do anel. As amostras com estrutura deformada foram retiradas com trado holandês, secas ao ar, passadas em peneira de 2 mm e acondicionadas em recipientes equivalentes aos utilizados para a coleta das amostras não deformadas.

O solo foi acondicionado nos recipientes, colocando-se uma massa de solo suficiente para alcançar a massa específica do solo em questão (Quadro 1). No fundo do recipiente foi colocada uma chapa de alumínio com pequenos furos e sobre esta uma tela de polietileno, a fim de evitar a perda de solo e permitir a passagem da água para saturação e drenagem. Os solos dos recipientes foram colocados para saturar por um período de 48 h.

Depois de atingida a saturação, foi instalada uma guia de onda no sentido vertical em cada recipiente. Inicialmente, as massas do recipiente contendo o solo e das guias de onda foram determinadas em balança eletrônica com 0,01 g de precisão. Em seguida, os recipientes foram mantidos em estufa à temperatura de 60 °C durante o dia e 30 °C durante a noite, sendo realizadas pesagens em intervalos de 2 h, no período das 8 às 18 h, até que o conteúdo de água no solo se aproximasse do valor do ponto de murcha permanente. Nesse momento, a constante dielétrica do solo ( $K_a$ ) foi determinada com a TDR 100 da Campbell Cientific, e o conteúdo gravimétrico de água na amostra foi determinado pela massa do recipiente contendo solo e uma sonda inserida. Após a última pesagem e leitura da  $K_a$ , foram determinados a massa do solo seco e o conteúdo gravimétrico de água final, por meio do método-padrão em estufa. Com base nas massas de solo seco, da massa específica do solo e das massas úmidas determinadas diariamente, foram obtidos os valores do conteúdo volumétrico de água do solo ( $\theta$ ) (Equação 1) para cada determinação da  $K_a$ , por meio da equação 2.

$$\theta_i = \frac{PU_i - PS}{PS - PR} \times \frac{\rho_s}{\rho_a} \quad (1)$$

em que  $\theta_i$  é o conteúdo de água em base volumétrica;  $PU_i$ , a massa atual do solo úmido + PR, sendo PR a massa do recipiente + a massa das guias de onda + envoltórios (chapa de Al + tela de polietileno); OS, a massa do solo seco + PR;  $\rho_s$ , a massa específica do solo; e  $\rho_a$ , a massa específica da água.

As sondas de TDR, compostas de três hastes com 0,13 m de comprimento, no qual 0,10 m era efetivo e 0,05 m de resina, com espaçamento entre hastes de 0,017 m e sem resistor na haste central, foram confeccionadas no laboratório (Silva et al., 2005).

A partir dos valores de  $\theta$  e da  $K_a$  determinados, foram testados cinco modelos de calibração das sondas de TDR:

#### Modelo de Topp et al. (1980)

$$\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} K_a - 5,5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4,3 \times 10^{-6} K_a^3 \quad (2)$$

em que  $\theta$  é o conteúdo volumétrico de água no solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) e  $K_a$  é a constante dielétrica do solo, adimensional.

#### Modelo de Ledieu et al. (1986)

$$\theta = 0,1138\sqrt{K_a} - 0,1756 \quad (3)$$

#### Modelo de Roth et al. (1990)

$$\theta = \frac{K_a^\alpha - (1 - \varepsilon) K_{a_s}^\alpha - (\varepsilon K_{a_a}^\alpha)}{(K_{a_w}^\alpha - K_{a_a}^\alpha)} \quad (4)$$

em que  $\varepsilon$  corresponde à porosidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  $\alpha$  é um parâmetro que leva em conta os efeitos do arranjo geométrico da matriz do solo; e  $K_{a_s}$ ,  $K_{a_a}$  e  $K_{a_w}$  são, respectivamente, as constantes dielétricas da matriz do solo, do ar e da água. Os valores de  $K_{a_s}$ ,  $K_{a_a}$  e  $K_{a_w}$  foram de 5, 1 e 80 (Coelho et al., 2006), respectivamente, para todos os cálculos.

#### Função polinomial cúbica

$$\theta = a + bKa^2 + cKa^2 + dKa^3 \quad (5)$$

#### Função raiz quadrada

$$\theta = \varepsilon\sqrt{Ka} - f \quad (6)$$

Os parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ ,  $f$  e  $\alpha$  foram obtidos minimizando-se a soma dos quadrados dos desvios entre os valores observados e estimados de  $\theta$ .

As análises consistiram em testar os diferentes modelos de calibração, que estimam  $\theta$  em função de  $K_a$ , sendo os valores de  $\theta$  compreendidos na faixa de umidade entre a saturação e o ponto de murcha permanente de cada solo, e avaliar o efeito do tipo de solo e da amostragem (amostra deformada e não deformada) nos valores de  $\theta$  para um mesmo valor de  $K_a$ , com valores de  $\theta$  compreendidos na faixa de umidade entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente de cada solo e tipo de amostra. Como no Neossolo Quartzarênico foram coletadas somente amostras deformadas, a análise estatística foi realizada considerando dois diferentes delineamentos. Na análise dos modelos de calibração foi considerado o delineamento inteiramente casualizado, com três tipos de solo e três repetições, sendo utilizadas amostras de solo com estrutura deformada. Para avaliar o efeito da classe de solo e do tipo de amostragem nos valores de  $\theta$ , para um mesmo

valor de  $K_a$ , foi considerado o delineamento inteiramente casualizado, com fatorial 2 (tipos de solo) x 2 (amostra deformada e não deformada), com três repetições.

Para se obter o valor do conteúdo de água para cada tipo de solo e amostragem, em função do mesmo valor de  $K_a$ , foram determinados, para uma faixa de valores de  $K_a$ , os valores do conteúdo de água no solo com uso da equação de calibração respectiva a cada tratamento, sendo utilizados os valores do conteúdo de água no solo compreendidos entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente.

Os diferentes modelos de calibração foram analisados com base no coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e pelo índice de concordância (d) proposto por Willmott (1981). O efeito do tipo de solo e do estado estrutural das amostras foi avaliado por meio da análise de variância a 5 %. As análises foram feitas com uso do software Statistica 7 (Hilbe, 2007).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado do teste F na análise da variância (Quadro 2) foi significativo somente para o tipo de solo, não havendo significância para o tipo de amostra e interação entre tipo de solo x tipo de amostra, indicando haver diferenças entre as médias dos valores do conteúdo de água para os diferentes tipos de solo (CX e LV), quando considerados os mesmos valores da constante dielétrica a 5 %.

Houve grande diferença entre as massas específicas do Cambissolo Háplico Tb distrófico (CX) e do Latossolo Vermelho ácrico típico (LV) (Quadro 1). Essa é uma variável que conduz à ocorrência de diferenças nos valores do conteúdo de água no solo para um mesmo valor da  $K_a$ , pois existe diferença entre as proporções de espaços vazios no solo (preenchidos por água e ar) e a matriz sólida. Esses resultados corroboram a afirmação de Souza et al. (2001), de que a massa específica do solo tem influência nas leituras do conteúdo de água no solo com uso da técnica TDR. Trintinalha (2000) avaliou a influência da compactação do solo sobre as leituras de um equipamento de TDR e concluiu que a massa específica do solo exerce

influência sobre a leitura do aparelho e que, portanto, o modelo de calibração deveria incluir a variável massa específica do solo. Segundo Souza et al. (2001) e Andrade et al. (2003), há ainda a influência dos óxidos de Fe na leitura da constante dielétrica do solo, que pode ter influenciado os resultados, visto que os Latossolos (LV) caracterizam-se pela grande presença desses componentes em sua constituição.

A ausência de significância do teste F para tipo de amostras deve-se, principalmente, ao fato de que no preenchimento dos recipientes com solo deformado o acondicionamento nos recipientes procurou reproduzir a massa específica do solo com sua estrutura não deformada. Assim, as proporções do volume de solo ocupado pela matriz sólida e por espaços vazios para ar ou água aproximaram-se em ambas as condições de amostragem. Coelho et al. (2001) relataram que para solos com valores de porosidade total muito próximos não há diferença significativa nos valores do conteúdo de água para um mesmo valor de constante dielétrica do solo. Portanto, é de se esperar uma pequena influência da estrutura do solo na determinação do conteúdo de água pela técnica TDR, devido aos baixos valores das constantes dielétricas das fases sólida e gasosa do solo, comparadas à da água.

As curvas de calibração para um mesmo solo, variando apenas o tipo de amostragem, ficaram praticamente sobrepostas (Figura 1). Quando comparados os diferentes tipos de solo, houve nítida diferença entre as curvas de calibração, reafirmando a necessidade da calibração para cada tipo de solo, não importando a forma de coleta das amostras.

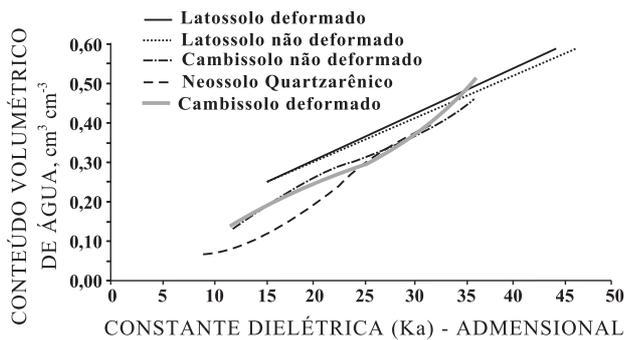
Nota-se que, no solo de textura argilosa (Cambissolo Háplico Tb distrófico), os baixos conteúdos volumétricos de água no solo ( $\theta$ ) apresentam menor constante dielétrica ( $K_a$ ) quando comparado com o solo de textura arenosa para o mesmo valor do conteúdo de água; à medida que  $\theta$  vai aumentando, o Cambissolo Háplico Tb distrófico passa a apresentar maior valor de  $K_a$  que o solo Neossolo Quartzarênico para um mesmo valor de  $\theta$  – fato que pode ter ocorrido devido à diferença de textura ou de superfície específica dos solos (Topp et al., 1980) (Figura 1).

O Latossolo Vermelho ácrico típico, durante toda a faixa de observação, apresentou menor valor da constante dielétrica do solo para um mesmo valor de

**Quadro 2. Análise de variância do experimento em delineamento inteiramente casualizado, fatorial 2 x 2, com três repetições**

Fontes de variação	GL	Soma de quadrados	Quadrado Médio	F
Tipo de amostra	1	0,00029151	0,000291519	3,9 <sup>ns</sup>
Tipo de solo	1	0,00877619	0,008776199	117,38*
Amostra x Solo	1	0,00032969	0,000329695	4,41 <sup>ns</sup>
Resíduo	8	0,00059813	0,000074766	

Coeficiente de variação = 2,71 %; ns: não significativo; e \*: significativo a 5 %.



**Figura 1. Curvas de calibração para obtenção do conteúdo de água no solo em função da constante dielétrica do solo para os diferentes tipos de solo com estruturas deformadas e não deformadas.**

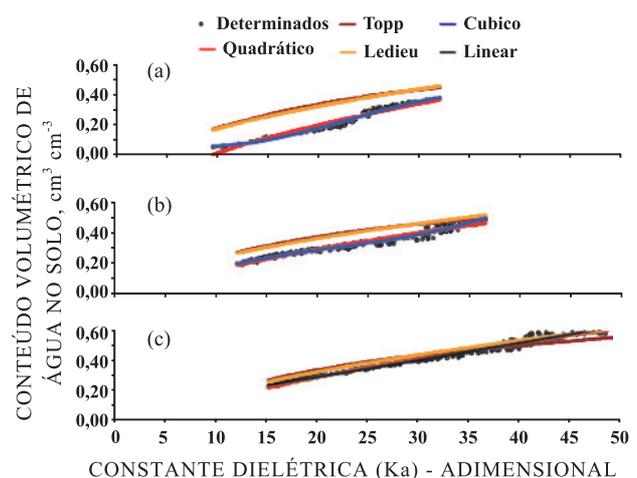
conteúdo volumétrico de água, sendo esse resultado atribuído à composição química do solo, rico em óxidos de Fe, que influenciam os valores da constante dielétrica do solo (Andrade et al., 2003). Outra explicação para esse resultado pode estar relacionada à porosidade total do solo. Como o Latossolo Vermelho ácrico típico apresenta porosidade total maior em relação à dos outros solos, para um mesmo conteúdo de água há um maior volume de poros preenchidos com ar no Latossolo Vermelho ácrico típico do que nos demais solos avaliados. Assim, tem-se uma maior influência da constante dielétrica do ar na leitura da constante dielétrica do solo e, como a constante dielétrica do ar apresenta valores baixos ( $K_{a} = 1$ ) em relação aos da água, a tendência é de haver menores valores da constante dielétrica do solo. Esse comportamento é mais claramente evidenciado na faixa de baixos conteúdos volumétricos de água, quando o ar presente no solo está em maior quantidade.

De acordo com a figura 2, os dados de conteúdo volumétrico de água no solo simulados com as equações de Topp e Ledieu, para os três tipos de solo em estudo, apresentaram a pior concordância com os dados determinados por gravimetria na faixa de baixos conteúdos volumétricos de água no solo, sendo esse comportamento evidenciado durante toda a faixa de conteúdo de água no solo para o Neossolo Quartzarênico (RQ). Esse resultado pode ser devido à presença de bolsas de ar, que, segundo Knight (1992), causam descontinuidade na propagação da onda eletromagnética. Na faixa de elevados conteúdos de água no solo, para Latossolo e Cambissolo, o modelo de Topp apresentou maior concordância com os dados determinados por gravimetria, devido à menor influência da constante dielétrica da matriz sólida e do ar no valor da constante dielétrica do solo, tendo em vista a maior dimensão do valor da constante dielétrica da água.

Para o Neossolo Quartzarênico (RQ) (Figura 2a), os modelos descritos pelas funções do tipo polinomial cúbica e raiz quadrada e o modelo de Roth et al. (1990) apresentaram bom ajuste aos dados de conteúdo

volumétrico de água determinados para os três tipos de solo. Esses resultados corroboram em parte os encontrados por Pereira et al. (2006), que obtiveram melhor estimativa do conteúdo de água no solo, em função da constante dielétrica do solo, com o uso de um modelo descrito por uma função polinomial cúbica, trabalhando com um solo do tipo Areia Quartzosa. Os modelos de Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986) não apresentaram boas estimativas dos valores do conteúdo de água no solo, superestimando-os. Essa diferença já era esperada, pois os parâmetros desses modelos foram obtidos em condições diferentes das estabelecidas neste experimento, sobretudo quanto ao tipo de solo e granulometria, sendo usados na maioria dos experimentos solos de textura argilosa a muito argilosa. Existe ainda o problema do menor contato das guias de onda com as partículas de solo nos solos arenosos, devido à sua baixa coesão, que, segundo Teixeira et al. (2003), causa erros na leitura da constante dielétrica do solo. Esse resultado corrobora a afirmação de Villwock et al. (2004), de que para cada tipo de solo existe a necessidade de obtenção de um modelo de calibração empírico para obtenção de bons resultados com o uso da técnica TDR.

No Cambissolo (CX) (Figura 2b), os modelos de Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986) mostraram bom ajuste aos dados do conteúdo de água determinados por gravimetria somente para os valores mais próximos à saturação, superestimando os valores no restante da curva. Esses resultados podem ser explicados pelos motivos anteriormente citados para o solo Neossolo Quartzarênico. Os outros modelos estudados, descritos pelas funções do tipo polinomial cúbica e raiz quadrada, e o modelo de Roth et al. (1990) apresentaram bom ajuste aos dados determinados por



**Figura 2. Estimativa do conteúdo volumétrico de água no solo por diferentes modelos em função da constante dielétrica, para Neossolo Quartzarênico (a), Cambissolo (b) e Latossolo Vermelho (c), comparados com os conteúdos de água determinados pelo método gravimétrico.**

gravimetria para os três tipos de solo em toda a faixa de conteúdo de água avaliada, sendo, portanto, mais indicados para este tipo de solo.

Para o Latossolo Vermelho (LV) (Figura 2c), as estimativas dos conteúdos de água pelos modelos de Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986) apresentaram uma superestimativa na faixa dos baixos valores do conteúdo de água e uma subestimativa na faixa dos altos valores; contudo, apresentaram melhores estimativas dos resultados em relação aos solos CX e RQ, como pode ser observado pelos valores de  $R^2$  (Quadro 3). Os erros podem ser atribuídos à presença de bolsas de ar e ao comportamento anormal da constante dielétrica da água em contato com as partículas coloidais (argila e matéria orgânica), que têm um comportamento diferente do da água livre (Bohl & Roth, 1994).

Esses resultados podem ser um indicativo de que esses modelos foram determinados em condições de solo parecidas com as encontradas no Latossolo Vermelho, ou seja, solos com alto teor de argila em sua composição. Para os demais modelos, como os de Roth et al. (1990) e aquele descrito por uma função raiz quadrada, os valores do conteúdo de água estimados apresentaram elevada concordância com os dados determinados por gravimetria (Quadro 3). Para o modelo descrito por uma função polinomial cúbica, como os parâmetros de segunda e terceira ordens não apresentaram significância estatística, um modelo descrito por uma função linear foi ajustado e mostrou a mais alta correlação entre os dados determinados e simulados entre todos os modelos ajustados (Quadro 3). Trintinalha et al. (2004), trabalhando com um solo de textura muito argilosa, também obtiveram como modelo de melhor ajuste uma equação descrita por uma função linear.

Coelho et al. (2006) ressaltaram que um modelo polinomial cúbico pode ser ajustado com exatidão para cada situação. Villwock et al. (2004), trabalhando com um Latossolo Vermelho distroférico típico, afirmaram que o melhor modelo de calibração para as condições de seu estudo foi o polinomial cúbico do tipo  $\theta = 0,332394 + 0,00000267 K_a^3$ , sem os termos de primeira e segunda ordens. Para o Latossolo Vermelho (LV) em estudo, os coeficientes de segunda e terceira ordens do modelo polinomial cúbico não apresentaram significância, sendo necessário apenas o ajuste de um modelo linear.

À medida que a textura do solo se torna mais argilosa (do Neossolo Quartzarênico para o Latossolo Vermelho) (Figura 2), a tendência é de que a relação entre os dados de conteúdo de água e  $K_a$  se torne linear, o que pode ser explicado pela alta capacidade de retenção de água deste solo. Esses resultados diferem dos encontrados por Tommaselli (1997), que obteve o modelo polinomial cúbico como superior a todos os outros, apresentando os maiores valores de coeficiente de correlação para solos com textura argilosa. Esse autor verificou, entretanto, que o coeficiente cúbico da equação de calibração deixa de ser importante à medida que a textura do solo se torna mais arenosa, o que não foi verificado neste trabalho. É evidente que, além da textura, os componentes químicos de cada solo podem ocasionar determinado comportamento. Villwock (2004) ressalta que especial atenção deve ser dada aos Latossolos, devido a algumas particularidades, como: alto teor de Fe, alto teor de argila e expansibilidade, como é o caso do Latossolo Vermelho (LV), que apresenta a característica de eletropositividade.

No quadro 3 é apresentada a avaliação dos modelos de calibração com base no coeficiente de determinação e no índice de concordância.

**Quadro 3. Avaliação dos modelos de estimativa do conteúdo volumétrico de água para os solos em estudo, coeficiente de determinação e índice de concordância, com uso de amostras de solo com estrutura deformada**

Solo	Modelo	Coefficiente de determinação ( $R^2$ )	Índice de concordância (d)
Cambissolo (CX)	Polinomial cúbico	0,97	0,99
	Raiz quadrada	0,93	0,98
	Topp et al. (1980)	0,52	0,84
	Ledieu et al. (1986)	0,72	0,87
	Roth et al. (1990)	0,94	0,99
Latossolo Vermelho (LV)	Linear	0,98	0,99
	Raiz quadrada	0,97	0,99
	Topp et al. (1980)	0,71	0,95
	Ledieu et al. (1986)	0,92	0,98
	Roth et al. (1990)	0,97	0,99
Neossolo Quartzarênico (RQ)	Polinomial cúbico	0,97	0,99
	Raiz quadrada	0,94	0,98
	Topp et al. (1980)	-	0,60
	Ledieu et al. (1986)	-	0,62
	Roth et al. (1990)	0,85	0,97

Verifica-se que os valores do conteúdo de água estimados pelo modelo polinomial cúbico mostraram uma concordância mais elevada com os dados determinados por gravimetria para os solos CX e RQ, apresentando maiores valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e índice de concordância (d). Para o solo LV, o modelo linear apresentou melhor ajuste aos dados determinados por gravimetria, conforme os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e índice de concordância (d) (Quadro 3). O modelo de Roth et al. (1990), apesar de apresentar índice de concordância (d) semelhante ao do modelo polinomial cúbico e ao do modelo linear, respectivamente para o Cambissolo e Latossolo Vermelho, apresentou menor coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (Quadro 3). Os modelos de Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986) foram os que apresentaram desempenhos menos precisos, onde, para o Neossolo Quartzarênico, não houve correlação entre os dados determinados e estimados pelo modelo (Quadro 3). Resultados semelhantes foram encontrados por Coelho et al. (2006) para o modelo de Topp et al. (1980).

O modelo semiempírico de Roth et al. (1990) apresentou uma estimativa precisa do conteúdo de água para todos os solos, pelo índice de concordância (d) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) apresentados no quadro 3. Os valores de  $\alpha$  foram de 0,8615, 0,7392 e 1,0790 para o Cambissolo (CX), Latossolo Vermelho (LV) e Neossolo Quartzarênico (RQ), respectivamente. Coelho et al. (2006), fixando o valor de  $\alpha$  em 0,75067, obtiveram um desempenho razoável utilizando este modelo para estimativa do conteúdo de água em Latossolo Vermelho-Escuro eutrófico, Neossolo Fúlvico e Latossolo Amarelo distrófico, empregando um sensor de TDR com resistor na haste central.

De todos os modelos testados para estimativa do conteúdo de água do solo em função da sua constante dielétrica, os dados simulados pelo modelo polinomial cúbico foram os que apresentaram a mais elevada concordância com os dados do conteúdo de água determinados por gravimetria para o Neossolo Quartzarênico e Cambissolo. Para o Latossolo Vermelho, os parâmetros c e d do modelo polinomial cúbico não apresentaram significância a 5 %, sendo assim, neste caso, gerado um modelo linear (Quadro 4), que mostrou um ajuste mais preciso aos dados determinados por gravimetria.

## CONCLUSÕES

1. O tipo da amostra de solo, deformada e não deformada, não interfere nos valores do conteúdo volumétrico de água no solo para um mesmo valor da constante dielétrica do solo.
2. Pode-se realizar a calibração do equipamento TDR para os solos em estudo com uso de amostras de solo deformadas.
3. Os modelos de Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986) superestimaram os valores do conteúdo volumétrico de água no Cambissolo, no Latossolo Vermelho ácrico típico e no Neossolo Quartzarênico.
4. Para o Cambissolo Háplico Tb distrófico e o Neossolo Quartzarênico, o modelo polinomial cúbico foi o que apresentou melhor ajuste aos dados do conteúdo de água determinados por gravimetria, enquanto para o Latossolo Vermelho ácrico típico o melhor ajuste foi encontrado com o modelo linear.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio e financiamento do projeto de pesquisa.

## LITERATURA CITADA

- ANDRADE, C.L.T.; COSTA, E.L. & ALBUQUERQUE, P.E.P. Desenvolvimento e calibração de guias de onda de TDR. R. Bras. Eng. Agric. Amb., 7:173-176, 2003.
- BOHL, H. & ROTH, K. Evaluation of dielectric mixing models to describe the  $\theta(\epsilon)$ -relations. In: TIME DOMAIN REFLECTOMETRY IN ENVIRONMENTAL, INFRASTRUCTURE, AND MINING APPLICATIONS, Evanston, 1994. Evanston, North Western University, 1994 p.309-319. (Special Publication SP, 19-94)
- CECÍLIO, R.A.; SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F. & MARTINEZ, M.A. Modelagem da infiltração de água no solo sob condições de estratificação utilizando-se a equação de Green-Ampt. R. Bras. Eng. Agric. Amb., 7:415-422, 2003.

**Quadro 4. Parâmetros dos modelos de melhor ajuste aos dados de  $\theta$  em função de  $K_a$  para os três tipos de solo**

Solo	Modelo	Parâmetros			
		a	b	c	d
Cambissolo	Polinomial cúbico	-0,113737	0,031929	-0,0011193	0,0000195
Latossolo	Linear	0,059486	0,01188		
Neossolo Quartzarênico	Polinomial cúbico	-0,17065	0,03652	-0,001829	0,0000437

- CECÍLIO, R.A.; SANTOS, D.B. & SOUZA, D.O. Proposta de metodologia para obtenção da curva de calibração de umidade do solo com aparelho de TDR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33., São Pedro, 2004. Anais. São Pedro, SBEA, 2004. CD-ROM
- COELHO, E.F.; VELLAME, L.M.; COELHO FILHO, M.A. & LEDO, C.A.S. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. R. Bras. Ci. Solo, 30:23-30, 2006.
- 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. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 5:81-87, 2001.
- HILBE, J.M. Statistica 7: An overview. Am. Statist., 61:91-94, 2007.
- KNIGHT, J.H. Sensitivity of time domain reflectometry measurements to lateral variations in soil water content. Water Res. Res., 28:2345-2352, 1992.
- LACERDA, R.D.; GUERRA, H.O.C.; BARROS JUNIOR, G. & CAVALCANTI, M.L.F. Avaliação de um TDR para determinação do conteúdo de água do solo. R. Biol. Ci. Terra, 5:1-12, 2005.
- LEDIEU, J.; DE RIDDER, P.; DE CLERCK, P. & DAUTREBANDE, S. A method for measuring soil water moisture by time-domain reflectometry. J. Hydrol., 88:319-328, 1986.
- OR, D. & WRAITH, J.M. Agricultural and environmental soil physics. Logan, Utah State University, 1997. 218p.
- PEREIRA, S.; OLIVEIRA FILHO, D.; MANTOVANI, E.C.; RAMOS, M.M. & MARTINS, J.H. Reflectometria no domínio do tempo na determinação do conteúdo de água no solo. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 10:306-314, 2006.
- ROBINSON, D.A.; BELL, J.P. & BATCHELOR, C.H. Influence of iron and titanium on water content determination by TDR. In: TIME DOMAIN REFLECTOMETRY APPLICATIONS IN SOIL SCIENCE HELD AT THE RESEARCH CENTRE FOULUM, Dinamarca, 1994. Anais. Tjele, Danish Institute of Plant and Soil Science, 1994. p.63-70.
- ROTH, C.H.; SCHULIN, R.; FLUHLER, H. & ATTINGER, W. Calibration of time-domain reflectometry for water content measurement using composite dielectric approach. Water Res. Res., 26:2267-2273, 1990.
- 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 calibrating soil moisture measurements by TDR. J. Soil Sci., 43:1-13, 1992.
- SILVA, A.J.P.; COELHO, E.F. & SANTOS, M.R. Avaliação de sondas de TDR para medidas da condutividade elétrica aparente e da umidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34., Canoas, 2005. Anais. Canoas, SBEA, 2005. CD-ROM.
- SILVA, E.L. & GERVÁSIO, E.S. Uso do instrumento TDR para determinação do teor de água em diferentes camadas de um Latossolo Roxo distrófico. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 3:417-420, 1999.
- SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E. & TESTEZLAF, R. Experience of the Laboratory of Hydraulics, Irrigation and Drainage of University of Agricultural Engineering/Unicamp in the use of the technique of TDR. In: MATSURA, E.E.; JAVAREZ JUNIOR, A.; GOMES, E.P. & SOUZA, C.F., eds. Applications of the technique of TDR in the Agriculture. Campinas, FEAGRI/UNICAMP, 2001. p.147-176.
- TEIXEIRA, W.G.; SCHROTH, G.; MARQUES, J.D. & HUWE, B. Sampling and TDR probe insertion in the determination of the volumetric soil water content. R. Bras. Ci. Solo, 27:575-582, 2003.
- TEIXEIRA, C.F.A.; MORAES, S.O. & SIMONETE, M.A. Desempenho do tensiômetro, TDR e sonda de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo. R. Bras. Ci. Solo, 29:161-168, 2005.
- TOMMASELLI, J.T.G. Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (Time Domain Reflectometry). Piracicaba, Escola Superior de "Agricultura Luiz de Queiroz", 1997. 109p. (Tese de Doutorado)
- TOMMASELLI, J.T.G. Criteria for calibration of probes of TDR. In: MATSURA, E.E.; JAVAREZ JUNIOR, A.; GOMES, E.P. & SOUZA, C.F., eds. Technical applications of TDR in the agriculture. Campinas, FEAGRI/UNICAMP, 2001. p.85-114.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L. & ANNAN, A. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. Water Res. Res., 16:576-583, 1980.
- TRINTINALHA, M.A. Avaliação da técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) na determinação da umidade em um Nitossolo Vermelho eutroférrico. Maringá, Universidade Estadual de Maringá, 2000. 64p. (Tese de Mestrado)
- TRINTINALHA, M.A.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; COSTA, A.C.S.; FOLEGATTI, M.V.; FREITAS, P.S.L. & REZENDE, R. Comparação dos sistemas TDR e ECHO para medida de umidade, em um solo argiloso e em areia. Acta Sci., 26:353-360, 2004.
- VAZ, C.M.P.; MATSURA, E.E.; TORRADO, P.V. & BACCHI, O.O.S. Validação de 3 equipamentos de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) para a medida da umidade de solos. São Carlos, Embrapa, 2004. 4p. (Comunicado Técnico, 61)
- VILLWOCK, R.; TAVARES, M.H.F. & VILAS BOAS, M.A. Calibração de um equipamento TDR em condições de campo. Irriga, 9:82-88, 2004.
- WILLMOTT, C.J. On the validation of models. Phys. Geog., 2:184-194, 1981.

