

Efeito da instalação e da variabilidade entre sondas no uso da técnica de TDR em um Nitossolo Vermelho Distroférico

Marcos Antonio Trintinalha¹, Antônio Carlos Andrade Gonçalves^{1*}, Marcos Vinícius Folegatti², Cássio Antônio Tormena¹, Altair Bertonha¹ e Jun Tsukada¹

¹Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil.

²Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Av. Páduas Dias, 11, Piracicaba, São Paulo, Brasil. *Author for correspondence.

RESUMO. A umidade do solo é um conceito físico simples, mas a sua determinação apresenta algumas dificuldades. Dentre os métodos de determinação da umidade, destaca-se o TDR (Time Domain Reflectometry), por ser um método indireto, não destrutivo, rápido, supostamente pouco dependente dos fatores locais e bastante preciso. No entanto, existem indícios da influência de fatores externos sobre a sua operação, o que torna necessária a calibração local. Particularmente para solos tropicais, pouco se sabe a respeito da sua utilização. Este trabalho teve como objetivo avaliar um equipamento TDR para uso em um Nitossolo Vermelho Distroférico, da região Noroeste do Estado do Paraná, avaliando a influência da instalação das sondas e de características de cada sonda, sobre as curvas de calibração. As diferenças entre sondas não influenciaram na calibração para este solo. Por outro lado, o contato solo - sonda, que varia conforme a instalação, pode influenciar na medida de umidade realizada com o uso desta técnica.

Palavras-chave: TDR, umidade, irrigação, calibração.

ABSTRACT. TDR use on tropical soil as affected by probe characteristics and installation conditions. Although soil moisture is defined by a single physical concept, its determination is not necessarily simple. Since such determination is necessary to soil-water management studies and practices, direct and indirect methods have been developed. Although the Time Domain Reflectometry (TDR) technique has been widely used in recent years, research has shown that prior calibration must be undertaken before the use of this technique. Scanty information exists for tropical soils. Research was undertaken on a Rhodic Kandiudalf, commonly found in the northeast region of the state of Paraná, Brazil. Present study detects the effects of probe characteristics and of soil moisture conditions at the moment of probe installation on the TDR measurements. Installation effects was much more important than probe characteristics. Soil water content during probe installation process affects TDR readings, probably affecting soil-probe contact.

Key words: TDR, soil moisture, irrigation, calibration.

A medida da umidade do solo expressa, de forma quantitativa, o conteúdo de água que este apresenta, em um dado momento. Existem vários métodos para se determinar a umidade do solo, cada um apresentando vantagens e desvantagens. Os métodos de determinação de umidade no solo podem ser classificados em diretos e indiretos. O método gravimétrico pode ser realizado com a utilização de uma estufa ou um forno de microondas. Assim, como os demais métodos diretos, este é destrutivo, o que impede a repetição da medida da umidade no local.

Os métodos indiretos são aqueles por meio dos quais se torna possível determinar a quantidade de

água presente no solo utilizando-se medidas de características dos mesmos, relacionadas com a umidade. Esses métodos também apresentam algumas desvantagens, tais como a necessidade de calibração que, na maioria das vezes, pode ser influenciada por características do solo e por variações decorrentes do próprio meio ambiente. Pode-se identificar, no entanto, diversas vantagens, como a determinação do valor medido em um menor tempo e a possibilidade de verificação posterior, por não ser um método destrutivo. Entre os métodos indiretos, destacam-se o método que utiliza a sonda de neutrons, o método de resistência elétrica, a tomografia computadorizada com raio X, a

ressonância magnética e o método da Reflectometria no Domínio do Tempo ou Time Domain Reflectometry (TDR), cuja utilização motivou este estudo.

Este método tem despertado bastante interesse, pois é uma técnica não destrutiva, que não utiliza radiação, de manuseio fácil, já que é portátil, supostamente dotado de elevada exatidão, e pode fazer leituras com as sondas instaladas tanto no sentido horizontal como no vertical. Como os demais métodos, apresenta algumas desvantagens, como o pouco conhecimento que se tem sobre ele, particularmente para solos tropicais, visto que é um método ainda relativamente pouco estudado nestas condições. Além disso, é um método de custo elevado, sofre influências do meio, como da salinidade, dos óxidos de ferro, da textura e da temperatura dos solos durante a leitura, (Tommaselli, 1997; Robinson *et al.*, 1994). Dentre os diversos fatores que podem influenciar as leituras do TDR, o contato solo-sonda merece particular atenção.

A metodologia de uso do TDR foi desenvolvida, inicialmente, por Fellner-Feldegg (1969). Segundo esse autor, essa técnica consiste em se medir o tempo de percurso de um pulso eletromagnético (EM) ao longo de um caminho, constituído por uma sonda, que pode apresentar uma ou mais hastes metálicas, de comprimento conhecido, para a onda. Este tempo de percurso está relacionado com a constante dielétrica média (k) do meio no qual a sonda guia é inserida.

Topp *et al.* (1980) mostram que há várias possibilidades de aplicação da reflectometria de microondas, mas a de maior utilidade, do ponto de vista agrônomo, é a de determinação do conteúdo de água do solo. Outros, como Dalton *et al.* (1984), Dalton e Van Genuchten (1986) e Nadler *et al.* (1991), aplicam o método na determinação da condutibilidade elétrica dos solos, com vistas à avaliação da salinidade da solução do solo.

Tommaselli (1997) relata que uma das características mais atrativas da técnica da TDR é a sua habilidade de monitorar, contínua e simultaneamente, o conteúdo de água do solo (θ) em vários locais. Zegelin *et al.* (1989) dizem que a técnica apresenta a vantagem da rapidez, uma vez que realiza amostragens em intervalos de tempo muito pequenos, podendo ser de alguns segundos apenas. Segundo os mesmos autores, pode-se utilizar a técnica do TDR para outros materiais porosos, desde que estes tenham condutibilidade elétrica baixa e as relações $k(\theta)$ dos mesmos sejam invariantes. Eles utilizaram a técnica para monitorar

o conteúdo de água em materiais diversos, como carvão, minérios, grãos de cereais, lã, madeira e concreto.

Topp e Davis (1985) obtiveram desvios de até $0,02 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ entre os valores de umidade medidos em um mesmo local, com o uso do TDR e com o método gravimétrico. Ao comparar valores obtidos em diferentes locais, o desvio foi de até $0,06 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, evidenciando o efeito da variabilidade do solo sobre a qualidade da informação fornecida pelo TDR. As leituras repetidas em um determinado local foram altamente correlacionadas.

Usando o modelo de calibração desenvolvido por Herkelrath *et al.* (1991), Hook e Livingston (1996) derivaram fisicamente uma equação de calibração na qual o conteúdo volumétrico de água estava linearmente relacionado com o tempo de percurso do sinal de TDR. Tommaselli (1997) vem confirmar esse estudo dizendo que para a utilização da técnica da reflectometria de microondas (TDR), para a determinação do conteúdo de água do solo, basta introduzir duas hastes metálicas no solo, emitir um pulso de voltagem ao longo destas hastes e medir o seu tempo de trânsito para posterior cálculo da constante dielétrica. Ao se considerar que o solo é um material dielétrico a ser medido, deve-se lembrar que ele é constituído de três componentes: as partículas sólidas ($k'' = 3$ a 5), o ar dos poros ($k'' = 1$) e o conteúdo de água ($k'' = 81$). Portanto, segundo o mesmo autor, a velocidade do pulso aplicado será função de uma proporção entre três constituintes e, neste caso, define-se uma única permissividade relativa global ou aparente $K = (c/v)$, onde c é a velocidade da luz e v é a velocidade do pulso eletromagnético. Mas, na prática, a reflectometria de microondas é efetuada no domínio temporal, ou seja, mede-se apenas o tempo T de tráfego do pulso ao longo das hastes de metal de comprimento L inseridas no solo, e, assim, a equação toma a seguinte forma:

$$K_a = \left(\frac{c t}{2 L} \right)^2 \quad (01)$$

Em que K_a é a constante dielétrica aparente (adimensional), t é o tempo de deslocamento (ns), c é a velocidade da luz (30 cm/ns) e L é o comprimento da haste (cm).

Existem muitos trabalhos que relatam o efeito das variáveis externas sobre o funcionamento do TDR, como os de Hoeskstra e Delaney (1974) e Davis e Annan (1977), que concluíram, com base em suas medidas, que a composição textural do solo

tem uma influência muito pequena na constante dielétrica do solo úmido. Por outro lado, os dados de outros autores, tais como Wang (1980) e Newton (1977), mostram diferenças significativas na magnitude da constante dielétrica relativa para diferentes tipos de solo ao mesmo nível de umidade. No Brasil, Herrmann Jr. (1993) desenvolveu um sistema de medidas de umidade do solo, baseado em um testador de cabos e mostrou a necessidade de se estudar os efeitos dos óxidos de Ferro na constante dielétrica dos solos. Tommaselli e Bacchi (1995) estudaram três tipos de modelos de calibração aplicados a dois tipos de solo e mostraram que a curva de calibração do aparelho de TDR não se ajustou aos dados e que, desse modo, deveriam ser feitas calibrações empíricas distintas para cada tipo de solo.

Serrarens *et al.* (2000) disseram que a precisão de medidas de TDR é em grande parte controlada pela instalação da sonda e especificamente influenciada pelo grau de contato físico entre sondas de TDR e a terra circunvizinha, e pela compactação do solo. Quando o contato da terra com a sonda for incompleto, o ar faz com que as leituras sejam reduzidas. Weast (1986) diz que a constante dielétrica da água decresce com o aumento da temperatura. Outros estudos têm mostrado que o efeito da temperatura é menor quando comparado com outros erros de calibração (Ledieu *et al.*, 1986; Roth *et al.*, 1990). Persson e Berndtsson (1998) esclarecem que não devem ser notados erros associados às mudanças de temperaturas, pois são pequenos em relação a outros.

As experiências relatadas na literatura, sobre o uso do TDR, evidenciam a importância de se avaliar o efeito de algumas variáveis sobre a relação entre a umidade (θ) de um solo tropical e o valor de K_a medido por meio da aplicação desta técnica. No presente estudo, conduzido na unidade de pesquisa em agricultura irrigada da Universidade Estadual de Maringá, instalada em área de Nitossolo Vermelho Distroférico, comum na região Noroeste do Estado do Paraná, procurou-se avaliar o efeito das condições de instalação e de características de cada sonda sobre a relação θ e k_a .

Material e métodos

O experimento foi conduzido na unidade de pesquisa em agricultura irrigada da Universidade Estadual de Maringá, o Centro Técnico de Irrigação – CTI. Esta área está localizada no município de Maringá, Estado do Paraná, com latitude de 23°25' sul e longitude de 51°57' a oeste de Greenwich. A altitude média é de 540 m e o clima predominante,

segundo a classificação de Koeppen, é do tipo Cfa, mesotérmico úmido, com chuvas abundantes no verão e inverno seco, com precipitação média anual de 1500 mm. Nos meses de julho a agosto, concentram-se os menores índices de precipitação. A temperatura média anual é de 16,7°C, sendo que a média das mínimas alcança 10,3°C e a média das máximas atinge 33,6°C. O solo da área é classificado como Nitossolo Vermelho Distroférico (Embrapa, 1999), com A moderado. O relevo é suave ondulado, com declividade média de 8%. A composição granulométrica do solo da área experimental mostra que este contém 75,7% de argila, 12% de silte e 12,3% de areia. Com base nos valores médios obtidos para a camada de 0 a 0,60 m de profundidade, pode-se caracterizar este solo como sendo de textura argilosa.

A curva de retenção de água no solo da área experimental foi obtida a partir de amostras não deformadas de solo, coletadas em anéis metálicos com volume em torno de 90 cm³, retiradas na profundidade de 0,30 m. Para os potenciais entre 0 e -6,0 kPa, foi adotada a metodologia que utiliza mesa de tensão. Para os demais potenciais, exceto para -800 e -1500 kPa, as amostras foram submetidas às pressões correspondentes em câmara de Richards. Para os maiores módulos de potencial, foram usadas amostras deformadas de solo, também em câmara de Richards (Richards, 1948). O modelo de estimativa de umidade volumétrica, em função do potencial matricial, proposto por Van Genuchten (1980), foi utilizado para fazer os ajustes da curva de retenção de água no solo. Esta curva foi usada para estabelecer os valores de umidade correspondentes à capacidade de campo (C_c) e o ponto de murcha (P_m).

Amostras de solo foram coletadas no campo, em três camadas, correspondentes às profundidades de 0 a 0,20 m, de 0,20 a 0,40 m e de 0,40 a 0,60 m. Parte deste material foi usado para a análise granulométrica e parte para a determinação do conteúdo de água retido nos potenciais de -800 e -1500 kPa.

Para verificar a variabilidade entre as sondas e a variação da leitura decorrente do processo de instalação, foi utilizado um recipiente plástico com volume de aproximadamente 8.000 cm³, no interior do qual foi acondicionada uma massa de TFSA de aproximadamente 8,5 kg, obtendo-se valores de densidade do solo em torno de 1,0. Este recipiente teve o material no seu interior saturado e, em seguida, foi monitorado, por pesagem, a saída de água do mesmo, o que permitiu identificar, a cada instante, o conteúdo de água no seu interior. Uma vez que este sistema teve a variação do conteúdo de

água monitorada por um processo de pesagem, por conveniência de terminologia, optou-se por denominá-lo microlisímetro.

Em cada microlisímetro foram instaladas oito sondas de TDR que seguiram dois padrões de instalação. As sondas de números 1, 3, 5 e 7, foram instaladas com o solo seco. Logo após a instalação, foi realizada uma leitura da constante dielétrica aparente do solo. Em seguida, o solo foi saturado e uma nova leitura foi realizada; posteriormente, foram instaladas as sondas de números 2, 4, 6 e 8. Seguiu-se uma outra leitura, com o propósito de verificar se a instalação das sondas de números pares interferia na leitura das sondas de números ímpares, previamente instaladas. Como a precisão do equipamento é elevada, o que se traduz em uma habilidade deste de repetir a mesma leitura de K_a , enquanto a umidade do meio permanece constante, qualquer interferência que pudesse ocorrer em função da proximidade das sondas poderia ser detectada. Identificou-se que esta interferência não ocorreu.

Em seguida ao processo de montagem e saturação, foram feitas leituras regulares da constante dielétrica aparente do meio, da umidade com base em massa, obtida a partir da medida da massa do conjunto com uma balança de precisão e da umidade com base em volume. O processo de leitura foi realizado duas ou três vezes por dia, durante um ciclo de secagem do material, até que o mesmo se apresentasse seco o bastante para assegurar que a umidade estivesse abaixo do ponto de murcha. As leituras de umidade fornecidas pelo equipamento foram um indicativo desta condição, o que foi confirmado posteriormente, por meio da determinação da umidade pelo método gravimétrico. Ao término dessas leituras, foi montado um novo microlisímetro. Foram utilizadas as mesmas sondas, numeradas da mesma forma, repetindo-se todo o processo.

Esta repetição do procedimento foi realizada com o propósito de se identificar o efeito das características de cada sonda isoladamente sobre a curva de calibração do equipamento. Caso fosse identificado um comportamento característico para cada sonda, independente do meio, seria ajustada uma curva de calibração para cada uma delas, conforme sugerido por Serrarens *et al.* (2000). Procurou-se avaliar, também, a dispersão entre as curvas de calibração das sondas, com o propósito de estudar a possibilidade de se usar uma curva única de calibração que descrevesse adequadamente a relação de umidade e constante dielétrica aparente do meio. Mantendo-se as características físicas do meio

uniformes, foi possível avaliar a influência do processo de instalação das sondas sobre as leituras do TDR.

Resultados e discussão

Para o solo estudado, a umidade correspondente à capacidade de campo é da ordem de $0,44 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. A umidade correspondente ao ponto de murcha, ou seja, em um potencial de -1500 kPa , é igual a $0,34 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Assim, a água disponível ou disponibilidade total de água (DTA) neste solo é da ordem de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, o que corresponde a $1,0 \text{ mm}$ de água por centímetro de profundidade de solo ($1,0 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-1} = 0,1 \text{ m} \cdot \text{m}^{-1}$). É nesta faixa de valores de umidade que as medidas são de maior importância para os objetivos agronômicos.

A instalação das sondas nos microlisímetros seguiu o padrão de se instalar quatro unidades antes de se proceder à saturação do solo e as outras quatro, após a saturação. Na Figura 1, são mostrados os valores de K_a e correspondentes valores de θ , obtidos durante o processo de secagem, partindo da saturação. Os valores de K_a apresentados correspondem às médias dos valores obtidos a partir das leituras realizadas com as sondas instaladas, antes e após a saturação. Por meio de análise de regressão simples, foram ajustados modelos polinomiais de terceiro grau, aos valores obtidos experimentalmente. Na Tabela 1 são apresentados os valores dos coeficientes dos modelos e o coeficiente de determinação (r^2).

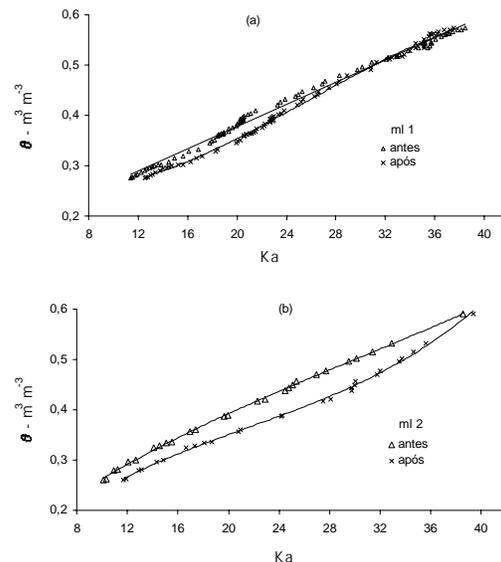


Figura 1. Relação entre valores médios de K_a e correspondente umidade, com base em volume obtida a partir das sondas instaladas antes e após a saturação do solo no interior dos microlisímetros ml1 (a) e ml1 (b)

Pode-se verificar na Figura 1 que as curvas, nos dois recipientes, tendem a coalescer quando a umidade se aproxima da saturação, assim como quando a secagem é intensa. Na faixa de umidade entre capacidade de campo ($0,44 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$) e ponto de murcha ($0,34 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$), o distanciamento entre as mesmas é máximo, evidenciando que a instalação das sondas em solo com baixa ou com alta umidade exerce influência sobre a curva de calibração do aparelho. Provavelmente, quando uma sonda foi instalada em solo seco, ocorreu elevada resistência do meio à compressão, deformação e rearranjo das partículas e/ou agregados. Já na condição de saturação, o efeito lubrificante da água entre partículas e/ou agregados, tornou possível maior reorientação das partículas e mesmo o fracionamento e/ou deformação dos agregados, tornando possível um maior contato da fração sólida com a sonda. Além disto, o volume total de poros na região de contato solo - sonda tende a ser reduzido, com a diminuição principalmente dos poros de maior diâmetro. Assim, quando a sonda foi instalada em solo saturado, o efeito discutido promove um maior contato entre a sonda e a matriz do solo.

Tabela 1. Coeficientes dos modelos polinomiais cúbicos ajustados aos valores de umidade em função de K_a ($\theta_v = a + b(K_a) + c(K_a)^2 + d(K_a)^3$)

ml 1	Coeficientes do modelo				r^2
	a	b	c	d	
antes	0,1579	0,0110**	ns	ns	0,994
depois	0,2781	-0,0093**	0,00088**	-1,1E-05**	0,998
ml 2					
antes	0,0698	0,0236**	-0,00050**	6,5E-06**	0,999
depois	-0,0126	0,0351**	-0,0012**	1,86E-05**	0,999

Nota: ** - significativo para $\alpha = 1\%$. ns - não significativo pelo teste t

Quando a umidade do solo atinge valores na faixa entre capacidade de campo e ponto de murcha, parte da porosidade do mesmo estará preenchida por ar e parte por água. Nesta condição, um melhor contato entre a matriz do solo e a sonda assegura um aumento da constante dielétrica do meio entre as hastas da sonda, fazendo com que, em uma determinada umidade do solo, os valores de K_a obtidos com as sondas instaladas após a saturação sejam maiores que os obtidos com as sondas instaladas antes da saturação. Isto pode ser visualizado na Figura 1. Próximo à saturação, praticamente todos os poros estarão preenchidos por água e o efeito diferenciado da instalação tende a não se manifestar. No extremo oposto, quando o solo está muito seco, predominam as fases sólida e gasosa do solo e, também neste caso, o efeito diferenciado da instalação tende a não se manifestar.

Para o ml 1, a máxima diferença entre as duas curvas é da ordem de $0,035 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. Em termos absolutos, este valor corresponde a menos de 10% do conteúdo de água que o solo apresenta, quando está na capacidade de campo. Para este solo em particular, no entanto, este valor corresponde a aproximadamente 35% da água disponível, sendo, portanto, um valor que não pode ser desprezado. Para o ml 2, a máxima diferença entre as duas curvas corresponde a $0,06 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, correspondente a 60% da água disponível. Para este solo em particular, portanto, o efeito de se instalar as sondas em solo seco ou em solo saturado, gerou uma diferença na leitura do TDR que não pode ser ignorada.

A Figura 2 mostra os valores de K_a e os correspondentes valores de umidade do solo, para as oito sondas instaladas nos dois micro lisímetros (ml 1 e ml 2). Ao conjunto de pontos experimentais em cada um deles, foi ajustado um modelo linear, por meio de regressão, apresentado nesta figura. As retas correspondentes são: para o ml 1, $y = 0,0111x + 0,1502$, com $r^2=0,9462$, e para o ml 2, $y = 0,0104x + 0,1612$ sendo o $r^2 = 0,929$.

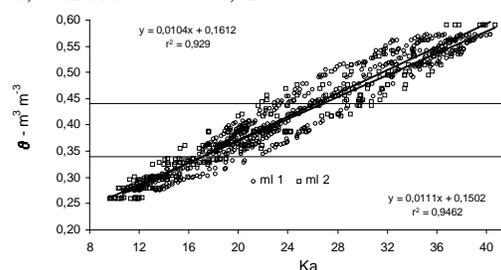


Figura 2. Relação entre valores de K_a e correspondente umidade, com base em volume para as oito sondas instaladas nos dois recipientes (micro lisímetros) utilizados

Verifica-se, na Figura 2, que os modelos lineares ajustados descrevem parcialmente a variação total observada dos dados no ml 1 ($r^2=0,9462$) e no ml 2 ($r^2=0,929$). Apesar desta dispersão dos valores medidos, a diferença entre os modelos ajustados pode ser desprezada, para fins práticos, sobretudo na faixa de umidade de maior interesse agrônomo, ou seja, entre a capacidade de campo e o ponto de murcha. Conforme mostrado no gráfico, entre estes valores, as duas retas praticamente se sobrepõem. Neste caso, embora não mostrados no gráfico, os intervalos de confiança dos parâmetros dos modelos se sobrepõem, ou seja, estatisticamente os dois modelos são semelhantes ($p>0,05$). Isto revela que, embora haja uma considerável dispersão entre os valores obtidos a partir de cada sonda, um número de repetições da ordem de grandeza, equivalente ao número de sondas utilizadas (oito), pode conduzir a

um valor médio representativo da umidade do solo, ou melhor, a uma curva de calibração representativa para o equipamento.

Pode-se observar, na Figura 2, que a faixa de valores de umidade correspondente à disponibilidade total de água neste solo (DTA) é relativamente estreita em relação à dispersão dos dados. Em função disto, a dispersão dos pontos em torno do modelo ajustado faz com que, em um mesmo recipiente, existam sondas que, para um dado valor de K_a , apresentem umidade próxima à capacidade de campo ou próxima ao ponto de murcha.

Com o propósito de avaliar com mais detalhes esta questão, foram construídos os gráficos apresentados na Figura 3, nos quais os valores de umidade do solo e de K_a para as sondas de números 3, 4 e 8. Para as demais sondas, as curvas obtidas encontram-se no intervalo entre estas e não foram mostradas para permitir melhor visualização da faixa de valores de θ , para um dado valor de K_a .

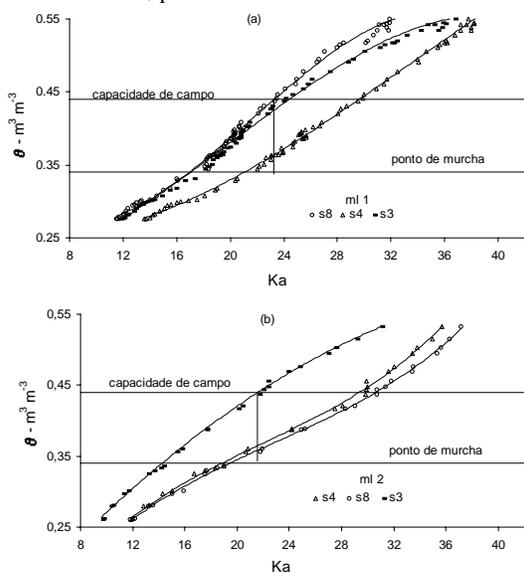


Figura 3. Relação entre valor de K_a e correspondente umidade, com base em volume para os valores obtidos a partir das sondas 3, 4 e 8 instaladas no interior dos microlisímetros (a) e (b)

Na Figura 3 (ml 1), encontrou-se, para um valor de $K_a = 23,3$, um valor correspondente $\theta = 0,439 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ para a sonda 8, que é o valor correspondente à capacidade de campo para o solo em estudo. Para o mesmo K_a , encontrou-se um valor de θ para a sonda 4 de $0,363 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. A diferença entre os valores obtidos com as duas sondas é igual a $0,076 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, o que corresponde a 76 % da DTA. Ou seja, para um dado valor de K_a medido, a variação da umidade que pode ser obtida, ao se usar dados de uma ou de outra

sonda, corresponde a 76 % da DTA. Isto revela a pouca exatidão da medida obtida com o aparelho para este solo.

Esse fato se repete com maior intensidade quando se analisa a Figura 3 (ml 2), onde, para um valor de $K_a = 21,8$ para a sonda 3, encontrou-se um valor $\theta = 0,442 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, correspondente à capacidade de campo. Para a sonda 8, o valor de θ , correspondente ao mesmo K_a , foi de $0,356 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, ocasionando uma diferença entre os valores de umidade obtidos com estas sondas, da ordem de $0,086 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, o que corresponde a 86 % da DTA do solo estudado.

Esta grande variação, observada entre as leituras realizadas com o equipamento em sondas instaladas em um ambiente supostamente homogêneo para fins práticos, revela a importância de se calibrar o equipamento antes de utilizá-lo para fazer inferências sobre o conteúdo de água do solo, quando o objetivo é o manejo da água em sistemas de produção vegetal ou em estudos ambientais.

Na Tabela 2, são apresentados os coeficientes do modelo polinomial cúbico ajustado aos valores de θ em função de K_a , para cada sonda isoladamente, mostrado na Figura 3.

Tabela 2. Coeficientes dos modelos polinomiais cúbicos ajustados aos valores de umidade em função de K_a ($\theta = a + b(K_a) + c(K_a)^2 + d(K_a)^3$)

ml	Coeficientes do modelo				r^2
	a	b	c	d	
ml 1					
s3	0,2001	ns	0,00067**	-1,115E-05**	0,996
s4	0,2226	ns	0,00032**	-2,546E-06**	0,998
s8	0,3290	-0,0199**	0,0016**	-2,509E-05**	0,996
ml 2					
s3	0,0758	0,0218**	-0,00023**	ns	0,998
s4	-0,0039	0,0333**	-0,00112**	1,703E-05**	0,998
s8	0,0102	0,0306**	-0,00098**	1,427E-05**	0,998

Nota: ** - significativo para $\alpha = 1\%$. ns - não significativo pelo teste t

Pode-se verificar na Tabela 2 que os modelos ajustados explicam adequadamente a variação dos dados experimentais, o que é expresso por valores de r^2 acima de 0,996. Pode-se observar também na Tabela 2 que, exceto para a sonda 3 (s3) no ml 2, para qual um polinômio de segundo grau se mostrou adequado, os coeficientes dos termos de terceiro grau foram significativos para as demais sondas.

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, verificou-se que a umidade do solo, no momento da instalação da sonda, pode influenciar na leitura realizada com o TDR, uma vez que pode interferir no contato solo - sonda. Mesmo em um ambiente altamente homogêneo, a variação da leitura entre sondas do TDR foi elevada, podendo a diferença

entre valores de umidade atingir valores próximo à disponibilidade total de água no solo.

Para uma mesma umidade de material homogêneo, a variação entre leituras de sondas diferentes foi grande. A comparação entre repetições permite verificar que esta variação não decorre da sonda e sim da condição de instalação. Não é solução para uso adequado do TDR, a calibração de cada sonda isoladamente.

Quando se introduz uma sonda no solo e se efetua uma leitura isolada de K_a , a exatidão com que se obtém um valor de umidade do solo correspondente pode ser insuficiente para as aplicações práticas, mesmo que uma curva de calibração tenha sido estabelecida. Por outro lado, sempre que se instala uma sonda no solo, a sensibilidade das leituras de K_a à variação do conteúdo de água do solo conduz a uma precisão na identificação da variação da umidade que torna o TDR um equipamento muito conveniente para as aplicações que envolvem manejo de água.

Referências

- DALTON, F. N. *et al.* Time-Domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science*, Washington D.C., v.224, p.989-900, 1984.
- DALTON, F. N.; VAN GENUCHTEN, M. T. The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma*, Amsterdam, v.38, p.237-250, 1986.
- DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. *Electromagnetic detection of soil moisture*. Progress Report, 1. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Ottawa, v.3, n.1, p.76-86, 1977.
- EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de solos. Embrapa, 1999.
- FELLNER-FELDEGG, H. The measurement of dielectrics in the time domain. *J. Phys. Chem.*, v.73, p.616-623, 1969.
- HERKELRATH, W.N. *et al.* Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. *Water Resour. Res.*, Washington, D.C., v.27, p.857-864, 1991.
- HERRMANN JR., P. S. P. *Construção de um equipamento para medida de umidade do solo através de técnica de microondas*. 1993. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.
- HOESKSTRA, P.; DELANEY, A. Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. *J. Geophys. Res.*, Washington D.C., v.79, p.1699-1708, 1974.
- HOOK, W.R.; LIVINGSTON, N. J. Errors in converting time domain reflectometry measurements of propagation velocity to estimates of soil moisture content. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.60, p.35-41, 1996.
- LEDIEU, J. *et al.* A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. *J. Hydrol.*, Amsterdam, v. 88, p. 319-328, 1986.
- NADLER, A. *et al.* Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soils columns. *Soil Sci. Am. J.*, Madison, v.55, p.938-943, 1991.
- NEWTON, R. W. *Microwave remote sensing and its applications to soil moisture detection*. Austin: Texas University, 1977. (College Station, Technical Report, RSC-81).
- PERSSON, M.; BERNDTSSON, R. Texture and electrical conductivity effects on temperature dependency in time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.62, p.887-893, 1998.
- RICHARDS, L.A. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Sci.*, Baltimore, v.66, p.105-110, 1948.
- ROBINSON, D.A. *et al.* Influence of iron minerals on the determination of soil water content using dielectric techniques. *J. Hydrol.*, Amsterdam, v.161, p.169-180, 1994.
- ROTH, K. *et al.* Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resour. Res.* Washington D.C., v. 26, p. 2267-2273, 1990.
- SERRARENS, D. *et al.* Soil moisture calibration of TDR multilevel probes. *Scientia Agricola*, v.57, n.2, p.349-354, 2000.
- TOMMASELLI, J.T.G.; *Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (Time-Domain Reflectometry)*. 1997. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.
- TOMMASELLI, J.T.G.; BACCHI, O. O. S. *Calibração de um equipamento de reflectometria de microondas para dois solos paulistas típicos*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., Viçosa, 1995. Resumos... Viçosa: UFV, v.I, 1995, p.24.
- TOPP, G. C.; DAVIS, J.L. Measurement of soil water content using Time-domain Reflectometry (TDR): A Field Evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.49, p.19-24, 1985.
- TOPP, G. C. *et al.* Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, Washington D.C., v. 16, p.574-582, 1980.
- VAN GENUCHTEN, M. TH. A closed-form solution for predicting the conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.
- WANG, J.R. The dielectric properties of soil water mixtures at microwave frequencies. *Radio Science*, v.15, p.977-985, 1980.
- WEAST, R. C. *Handbook of physics and chemistry*, 67. ed. Boca Raton: CRC Press, 1986.
- ZEGELIN, S. J. *et al.* Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Resour. Res.*, Washington D.C., v.25, n.11, p.2367-2376, 1989.

Received on June 29, 2001.

Accepted on August 23, 2001.