



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbcs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

Teixeira, Claudia Fernanda Almeida; Moraes, Sergio Oliveira; Simonete, Marcia Aparecida
DESEMPENHO DO TENSÍMETRO, TDR E SONDA DE NÊUTRONS NA DETERMINAÇÃO DA
UMIDADE E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO
Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 29, núm. 2, 2005, pp. 161-168
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180214036001>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

DESEMPENHO DO TENSÍÔMETRO, TDR E SONDA DE NÊUTRONS NA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO⁽¹⁾

Claudia Fernanda Almeida Teixeira⁽²⁾, Sergio Oliveira Moraes⁽³⁾
& Marcia Aparecida Simonete⁽⁴⁾

RESUMO

Técnicas que envolvem a utilização da instrumentação agrônômica com vistas em determinar o conteúdo de água no solo são de grande importância para a pesquisa científica. Independentemente da técnica utilizada, é importante que, na determinação da função $K(\theta)$, por exemplo, a umidade volumétrica seja determinada de forma precisa e, de preferência, que haja facilidade na sua obtenção. Com o objetivo de comparar a performance da sonda de nêutrons e do TDR com o tensiômetro, buscando verificar a sensibilidade destes equipamentos na obtenção da umidade do solo e da função condutividade hidráulica $K(\theta)$, a partir dos dados da curva de retenção de água no solo, foi instalado um experimento no município de Piracicaba (SP), em um Nitossolo Vermelho distrófico latossólico. Para tanto, foram instalados numa área de 7,07 m², 30 tensiômetros, três tubos de acesso para sonda de nêutrons e 15 sensores de TDR. Foi utilizado o procedimento do perfil instantâneo, analisando as profundidades de 0,70 e 1,00 m e considerando, no presente estudo, o tensiômetro como equipamento-padrão. Os resultados de umidade e de condutividade hidráulica não saturada obtidos na profundidade de 0,70 m mostraram que o TDR apresentou um comportamento mais próximo ao obtido pelo tensiômetro, quando comparado à sonda de nêutrons e, na profundidade de 1,00 m, a sonda de nêutrons mostrou-se mais eficiente na determinação da umidade e da condutividade hidráulica não saturada.

Termos de indexação: propriedades hidráulicas do solo, água do solo, drenagem.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado da primeira autora, apresentada à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ. Recebido para publicação em agosto de 2003 e aprovado em novembro de 2004.

⁽²⁾ Doutoranda do Departamento de Solos da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ. Av. Pádua Dias 11, Caixa Postal 9, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). Bolsista CAPES. E-mail: cfteixeira@ig.com.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Ciências Exatas, ESALQ. E-mail: somoraes@carpa.ciagri.usp.br

⁽⁴⁾ Professora da Universidade Estadual de Santa Catarina – UDESC. Av. Luiz de Camões 2090, CEP 88520-000 Lages (SC). E-mail: a2mas@cav.udesc.br.

SUMMARY: *PERFORMANCE OF A TENSIO-METER, TDR AND NEUTRON PROBE FOR DETERMINING SOIL WATER AND SOIL HYDRAULIC CONDUCTIVITY*

The evaluation of agronomic instrumentation to determine soil water content is very important for scientific research. Regardless of the technique in use, it is important that the soil water content is determined easily and quickly for the determination of the function $K(\theta)$, e.g. With the objective of comparing the performance of the equipments neutron probe and TDR with a tensiometer at determining variations in the soil water content and the values of soil hydraulic conductivity obtained from the soil water retention curve, an experiment was installed on an Udox (Oxisol) in Piracicaba, state of São Paulo, Brazil. Thirty tensiometers, three access tubes for neutron probes and 15 TDR sensors were installed in a 7.07 m² area for this purpose. The instantaneous profile procedure was used, analyzing depths of 0.70 and 1.00 m, considering the tensiometer as standard equipment. The obtained data showed that the TDR presented the most similar data performance to the one obtained by the tensiometer at a depth of 0.70 m, while the neutron probe proved to be more efficient to determinate the soil water content and unsaturated hydraulic conductivity at a depth of 1.00 m.

Index terms: soil hydraulic properties, soil water, drainage.

INTRODUÇÃO

O conteúdo de água no solo é uma variável utilizada em estudos que envolvem agricultura, hidrologia e meteorologia, dentre outros. Na agricultura, essa informação é necessária para muitas aplicações, que incluem o planejamento da irrigação para o aumento da produção agrícola. Dentro deste contexto, o monitoramento do conteúdo de água torna-se importante para a obtenção, por exemplo, da função condutividade hidráulica do solo não saturado ($K(\theta)$).

A primeira equação que possibilitou a quantificação do movimento da água em meios porosos foi apresentada por Darcy (1856). Em meios porosos não saturados, a primeira modificação da equação de Darcy foi feita por Buckingham (1907), envolvendo o conhecimento de que a condutividade hidráulica depende da área do espaço poroso do solo não ocupado pelo ar, tornando-se dependente, portanto, do conteúdo de água ou do potencial mátrico do meio. A equação diferencial geral que descreve o movimento da água em meios porosos foi apresentada por Richards (1931), obtida pela substituição da equação de Darcy na equação da continuidade.

A partir da equação de Richards, vários pesquisadores têm desenvolvido métodos de campo e de laboratório para a determinação da condutividade hidráulica do solo não saturado (Dirksen, 1991). Para determinar a função $K(\theta)$, cobrindo uma faixa maior de umidade, é comum a utilização do método do perfil instantâneo (Hillel et al., 1972), que consiste na obtenção de medidas diretas no campo. Dentre as desvantagens, podem-

se destacar o consumo elevado de tempo e a mão-de-obra, tornando-se um dos grandes problemas para solos que apresentam camadas adensadas ou compactadas, onde o processo de drenagem é muito lento (Jong van Lier & Libardi, 1999).

Em decorrência das desvantagens apresentadas pelo método do perfil instantâneo, avanços no estudo de métodos para a determinação da função $K(\theta)$, baseada em outras características físicas, têm surgido, principalmente os baseados em dados obtidos a partir da curva de retenção de água no solo, dentre eles o de van Genuchten (1980), Pauletto et al. (1988), Tomasella & Hodnett (1997) e Arya et al. (1999).

Como a umidade do solo é fundamental para a determinação da função $K(\theta)$, a facilidade e a precisão de sua medida, por consequência, são de interesse para os pesquisadores de Física do Solo.

Existem métodos diretos e indiretos para a determinação do conteúdo volumétrico de água no solo. Dentre eles, destaca-se o método gravimétrico, considerado padrão, sendo, porém, demorado, destrutivo, além de impedir a repetição da amostragem no mesmo local.

A técnica da moderação de nêutrons pode ser utilizada para determinar o conteúdo de água em determinada profundidade no solo, apresentando como grande vantagem a sua natureza não-destrutiva. No entanto, sua utilização tem sido restrita, por causa da fonte radioativa, razão por que há necessidade da observância e do conhecimento de leis e normas que regulamentam e fiscalizam o uso desses materiais, constituindo uma grande desvantagem da sonda de nêutrons quando comparada, por exemplo, à técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR).

A TDR constitui uma técnica promissora que busca solucionar os problemas supracitados. Dentre as vantagens da técnica, destacam-se: característica não-destrutiva, rapidez na obtenção dos resultados, segurança do operador, além de permitir a multiplexação (Baker & Allmaras, 1990; Herkelrath et al., 1991) e, dessa forma, o monitoramento contínuo da água no solo, tanto no espaço quanto no tempo (Topp et al., 1980). Além disso, permite medidas simultâneas de conteúdo de água e condutividade elétrica no campo (Dasberg & Dalton, 1985; Dalton & van Genuchten, 1986), permite realizar leituras próximo à superfície e, sobretudo, no laboratório (Nadler et al., 1991), onde os métodos de moderação de nêutrons e radiação gama tornam-se inadequados.

Apesar das inúmeras vantagens da técnica, ainda são poucos os trabalhos que comparam métodos para a determinação da umidade do solo. Um deles é o trabalho de Dong Wang et al. (1998), que realizaram o experimento com o objetivo de determinar medidas simultâneas de taxa de infiltração, conteúdo de água no solo e potencial mátrico, utilizando infiltrômetros de tensão, TDR e tensiômetros. Os autores concluíram que o uso de pequenas sondas e tensiômetros durante o experimento possibilitou as medidas simultâneas desejadas. Apesar dos escassos trabalhos existentes na área, a International Atomic Energy Agency (IAEA, 2000) salienta que novos caminhos são necessários, para comparar as tecnologias e formular recomendações, com vistas em estabelecer linhas de pesquisas futuras.

Por esse motivo, a criação de novos métodos e equipamentos que possibilitem a análise das propriedades físicas do solo, com maior precisão, rapidez e confiabilidade, é sempre um desafio da pesquisa científica. Neste aspecto, técnicas que envolvam a utilização da instrumentação agrônômica com vistas em determinar o conteúdo de água no solo são de grande importância para a pesquisa científica.

O objetivo do trabalho foi comparar a performance da sonda de nêutrons e do TDR com o tensiômetro, buscando verificar a sensibilidade destes equipamentos na obtenção da umidade do solo e da função condutividade hidráulica $K(\theta)$, a partir dos dados da curva de retenção de água no solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado próximo ao Posto Agrometeorológico do Departamento de Ciências Exatas da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, cujas coordenadas geográficas são: 22° 42' 30" de latitude sul, 47° 38' 00" de longitude oeste, a 546 m de altitude. Conforme Embrapa (1999), o solo é classificado como Nitossolo Vermelho distrófico latossólico.

A área experimental foi de 7,07 m², na qual foram instalados 30 tensiômetros, 3 tubos de acesso para sonda de nêutrons e 15 sensores de TDR. Os equipamentos foram instalados de 0,10 em 0,10 m, a partir de 0,40 m da superfície, sendo avaliadas apenas as profundidades de 0,70 e 1,00 m. Como não se dispunha de sensores de TDR suficientes para todas as profundidades, estas foram selecionadas, considerando as repetições para os três equipamentos (3 para o tensiômetro, 3 para a sonda de nêutrons e 2 para o TDR).

Os tensiômetros foram construídos artesanalmente e, para a comparação da avaliação do desempenho da sonda de nêutrons e do TDR, foram considerados como referência. A sonda de nêutrons utilizada foi uma 503 Hydroprobe da CPN Corporation, munida de uma fonte de ²⁴¹Am/Be de atividade radioativa de 1,85 GBq e tempo de contagem de 30 s.

O equipamento utilizado baseado na técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) foi um testador de cabos da marca Tektronix, modelo 1502B, conectado a um "datalogger", modelo CR10X, marca Campbell Scientific, que controla e analisa as formas de onda produzidas pelo testador de cabos, possibilitando o acesso aos sensores do TDR pelo sistema de multiplexação. Os sensores do TDR foram introduzidos horizontalmente na área experimental, nas profundidades de 0,70 e 1,00 m.

Foram coletadas, concomitantemente, três amostras indeformadas para a confecção da curva de retenção de água no solo de acordo com Moraes (1991), cujas tensões aplicadas foram de 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 20; 33 e 50 kPa. Os dados de tensão e umidade obtidos foram ajustados, segundo van Genuchten (1980), utilizando o software SWRC (Dourado Neto et al., 1990).

Para a obtenção de variações nos valores de umidade volumétrica e, por consequência, em $K(\theta)$, nas profundidades de 0,70 e 1,00 m, utilizou-se o procedimento descrito pelo método do perfil instantâneo, de acordo com Hillel et al. (1972). A saturação da parcela experimental foi realizada de forma intermitente, com várias inundações, ou seja, foram realizadas inundações periódicas em que o volume de água foi adicionado gradativamente. Esse processo foi repetido duas vezes ao dia durante 10 dias, totalizando um volume mínimo estimado de 24 m³. Como este fato normalmente não é considerado em experimentos de drenagem interna, acredita-se que o processo de saturação tenha sido eficiente, ocasionando uma indicação correta do tempo zero de fechamento da parcela e, em seguida, o fechamento da mesma com a lona plástica (Guiberto, 1999).

Utilizou-se, para a calibração da sonda de nêutrons, a relação entre a contagem relativa e a umidade volumétrica de amostra coletada em local próximo (cerca de 0,50 m) à área experimental, nas duas profundidades de interesse.

Na calibração do TDR, optou-se pela determinação indireta da relação entre a constante dielétrica e a umidade do solo, ou seja, obteve-se a relação entre a constante dielétrica e o potencial mátrico obtido por tensiometria, bem como sua posterior relação com a umidade volumétrica pela curva de retenção de água no solo. Adotou-se a calibração indireta para não causar distúrbios na área experimental em razão da freqüente necessidade de coleta de amostra deformada para determinar a umidade gravimétrica e para diminuir os erros devidos à variabilidade espacial decorrente da realização de calibração externa à área experimental.

A condutividade hidráulica relativa foi determinada segundo van Genuchten (1980) e a condutividade hidráulica de solo saturado obtida em laboratório pelo método da carga constante (Youngs, 1991).

Para quantificar as diferenças entre as condutividades hidráulicas do solo não saturado, a partir de valores de umidade volumétrica obtidas pelas técnicas de moderação de nêutrons e reflectometria no domínio do tempo, foram utilizados os seguintes índices estatísticos: Índice de concordância (d) (Willmott et al., 1985), Coeficiente de determinação (CD), Eficiência (EF), Erro máximo (ME), Raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado ($RMSE$), Coeficiente de massa residual (CRM) e Erro absoluto médio (EAM) (Zacharias et al., 1996). Uma perfeita concordância entre a eficiência dos equipamentos testados resultaria em $d = CD = EF = 1$ e $ME = RMSE = CRM = EAM = 0$. Para a comparação foram utilizados os valores de $K(\theta)$ obtidos a partir do tensiômetro, tomado como padrão, e a sonda de nêutrons e entre o tensiômetro e o TDR, nas profundidades de 0,70 a 1,00 m.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As figuras 1 e 2 apresentam a variação da umidade volumétrica a partir do tempo zero até o final do experimento, para o tensiômetro, sonda de nêutrons e TDR, nas camadas de 0,70 e 1,00 m.

Os valores médios de umidade volumétrica ($n = 8$) obtidos próximos ao tempo zero, foram de $0,51 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, para o tensiômetro, de $0,57 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, para a sonda de nêutrons e de $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, para o TDR, na profundidade de 0,70 m (Figura 1). Comparando esses valores com os obtidos pela equação de van Genuchten (1980), para a mesma camada (Quadro 1), observa-se que os valores obtidos pelo tensiômetro, seguidos pelo TDR, foram próximos daqueles obtidos pelo ajuste ($0,52 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), com exceção da sonda de nêutrons que superestimou os valores de umidade. Turatti et al. (1990) consideram que, como a sonda de nêutrons amostra diferentes volumes do solo, variando de acordo com o tipo de solo e distribuição da densidade do solo e da umidade, o uso da sonda torna-se dependente da variabilidade dessas características. Provavelmente, esses maiores valores de umidade estão relacionados com maior densidade do solo nessa profundidade, que foi de 1.310 kg m^{-3} .

Os valores médios da umidade volumétrica residual ($n = 8$) (Figura 1), correspondentes ao tempo total de 1.260 h (final do experimento) foram iguais a $0,40$, $0,35$ e $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, para o tensiômetro, sonda de nêutrons e TDR, respectivamente, sendo estes maiores do que aqueles obtidos pelo ajuste que foi igual a $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Quadro 1). Esta variação de umidade evidencia a dificuldade que normalmente é encontrada em estudos de drenagem interna, particularmente neste solo, onde o movimento de água é bastante lento, fato também observado por Jong van Lier & Libardi (1999).

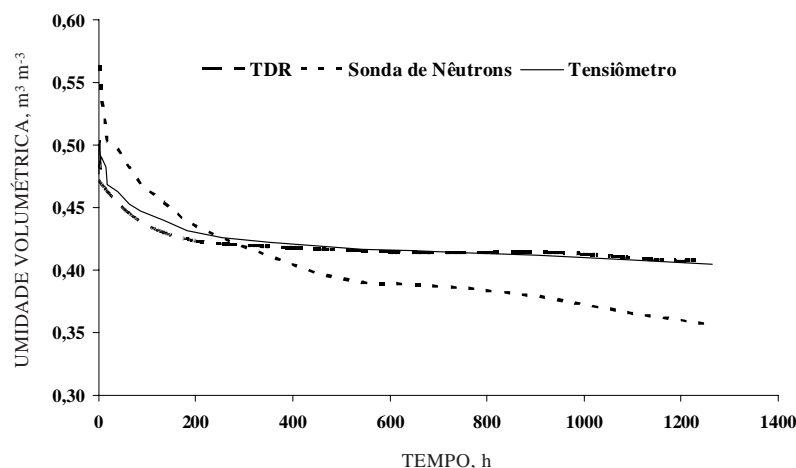


Figura 1. Variação da umidade volumétrica com o tempo para o tensiômetro, sonda de nêutrons e TDR, para a profundidade de 0,70 m.

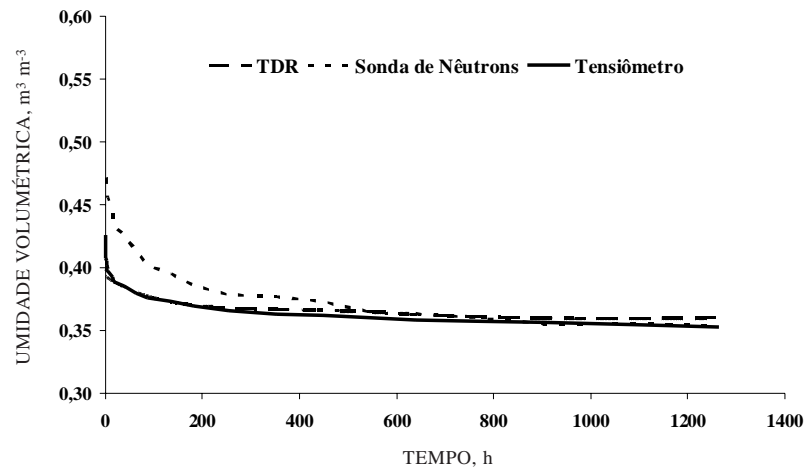


Figura 2. Variação da umidade volumétrica com o tempo para o tensiômetro, sonda de nêutrons e TDR, para a profundidade de 1,00 m.

Quadro 1. Parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980) correspondentes às profundidades de 0,70 e 1,00 m

Profundidade	Parâmetro					
	α (1/m)	m	n ⁽¹⁾	θ_r (m³ m⁻³)	θ_{sat} (m³ m⁻³)	R²
m						
0,70	17,21	0,1508	1,1776	0,25	0,52	0,954
1,00	73,26	0,1619	1,1932	0,23	0,55	0,967

⁽¹⁾ n dependente de m.

θ_r = umidade volumétrica residual, θ_{sat} = umidade volumétrica na saturação, α , m e n = parâmetros de ajuste do modelo.

Na camada correspondente a 1,00 m (Figura 2), a variação da umidade volumétrica manifestou-se, no início do processo, de forma diferente ao que ocorreu para a camada de 0,70 m, onde o valor médio encontrado foi de 0,46 m³ m⁻³, para o tensiômetro, de 0,49 m³ m⁻³, para a sonda de nêutrons e de 0,42 m³ m⁻³, para o TDR, sendo, portanto, menor do que o valor obtido pelo ajuste que foi igual a 0,55 m³ m⁻³. Esta redução pode estar relacionada com a presença de um B textural próximo à camada de 0,70 m, ocasionando, dessa forma, uma melhor saturação nesta profundidade e, por outro lado, dificultando o processo nas camadas inferiores, no caso de 1,00 m.

Analisando os valores de porosidade total, calculados a partir da relação $PT = 1 - D_s/D_p$, verificou-se que os valores de umidade de saturação estimados (Quadro 1) foram maiores do que os calculados, para a camada correspondente à profundidade de 0,70 e 1,00 m (Quadro 2). A superação da porosidade total calculada pelo θ_{sat} estimado, ou os valores não atingidos de θ_r pelos

instrumentos utilizados, pode constituir fato normal, uma vez que estes parâmetros não necessariamente apresentam significado físico desejado, podendo inclusive o θ_r atingir valores negativos (Castro, 2001).

As umidades ao final do experimento (θ_r) da camada de 1,00 m foram iguais a 0,35 m³ m⁻³, para o tensiômetro, a 0,36 m³ m⁻³, para a sonda de nêutrons e a 0,37 m³ m⁻³, para o TDR, sendo maiores do que os valores estimados pelo ajuste que foi de 0,23 m³ m⁻³.

Quadro 2. Valores médios e coeficientes de variação da porosidade total (PT) calculada, para as profundidades de 0,70 e 1,00 m

Profundidade	Média	C.V.
m	m³ m⁻³	%
0,70	0,42	5,0
1,00	0,47	7,1

Os valores são médias de três repetições.

Avaliando os valores de $K(\theta)$ obtidos para cada equipamento nas profundidades de 0,70 e 1,00 m (Quadro 3), observou-se que eles foram mais discrepantes na profundidade de 0,70 m, enquanto, na profundidade de 1,00 m, os valores de $K(\theta)$, em geral, apresentaram a mesma ordem de grandeza.

Considerando a profundidade de 0,70 m e tempo de 200 h, verificou-se que os valores de $K(\theta)$ foram superestimados pelos equipamentos utilizados neste estudo, quando comparados com o valor de 0,53 mm dia⁻¹, obtido por Prevedello (1987), no mesmo solo, profundidade e tempo.

Os valores de $K(\theta)$ obtidos para os três equipamentos, na profundidade correspondente a 1,00 m, podem ser comparados aos obtidos por Saunders et al. (1978), considerando o mesmo solo, profundidade de 1,20 m, utilizando sonda de nêutrons e a função $K(\theta)$ obtida pelo método do perfil instantâneo. Para o tempo de 200 h, os valores de $K(\theta)$ encontrados foram de 0,05, 0,46 e 0,16 mm dia⁻¹, para o tensiômetro, sonda de nêutrons e TDR, respectivamente, enquanto, para Saunders et al. (1978), para o mesmo tempo, foi de 0,29 mm dia⁻¹, com uma umidade volumétrica média de 0,339 m³ m⁻³. Portanto,

a sonda de nêutrons e o TDR apresentaram valores de $K(\theta)$ da mesma ordem de grandeza dos obtidos por Saunders et al. (1978).

Normalmente, adota-se a relação entre os valores de $K(\theta)$ e a umidade como sendo exponencial do tipo $K(\theta) = K_0 e^{\gamma(\theta-\theta_0)}$ (Libardi, 1980), assim, as oscilações na determinação de θ pelos equipamentos fornecem valores bastante discrepantes de $K(\theta)$. Segundo Warrick & Nielsen (1980), a condutividade hidráulica do solo não saturado é uma das características físicas do solo que apresenta um dos maiores coeficientes de variação, chegando a 400 %. Villagra et al. (1988), trabalhando com tensiometria e variabilidade espacial no mesmo solo, demonstraram que erros de 1 a 2 % no valor absoluto de θ ocasionam erros de mais de 100 % na condutividade hidráulica, já que θ é obtida indiretamente pela relação entre a contagem relativa da sonda de nêutrons e a umidade gravimétrica. Salientaram, ainda, que esta não é uma limitação do método da moderação de nêutrons, fato constatado neste estudo, em que se observaram diferenças entre as próprias repetições dos equipamentos utilizados, o que, provavelmente, acarretou variações nos valores finais da condutividade.

Quadro 3. Condutividade hidráulica não saturada ($K(\theta)$), obtida para os três equipamentos, correspondente às profundidades de 0,70 e 1,00 m

Tempo	$K(\theta)$ (mm dia ⁻¹)					
	Tensiômetro	Sonda de Nêutrons	TDR	Tensiômetro	Sonda de Nêutrons	TDR
h	0,70 m			1,00 m		
200	3,97	6,40	2,25	0,05	0,46	0,16
400	1,64	0,17	2,06	0,02	0,11	0,01
600	1,27	0,09	1,09	0,02	0,08	0,02
800	1,11	0,24	1,10	0,02	0,04	0,52
1.000	0,59	0,02	1,49	0,01	0,06	0,05
1.200	0,45	0,01	0,76	0,01	0,03	0,06

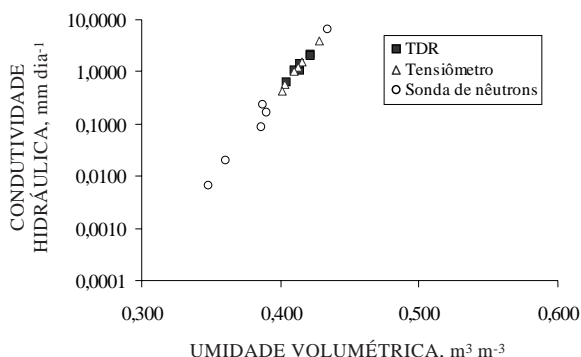


Figura 3. Condutividade hidráulica não saturada, considerando os três equipamentos, para a profundidade de 0,70 m.

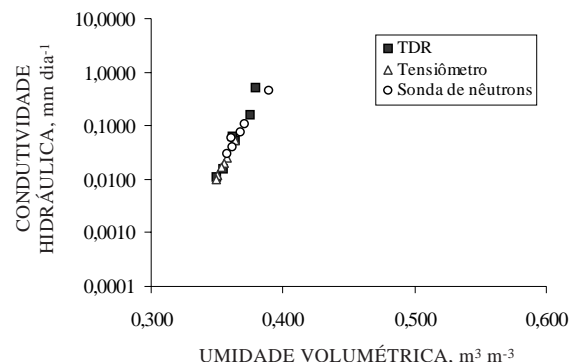


Figura 4. Condutividade hidráulica não saturada, considerando os três equipamentos, para a profundidade de 1,00 m.

Quadro 4. Índices para verificação da concordância entre as condutividades hidráulicas, obtidas para as profundidades de 0,70 e 1,00 m, considerando as comparações entre os equipamentos

Índice ⁽¹⁾	Tensiômetro vs Sonda de Nêutrons		Tensiômetro vs TDR	
	0,70 m	1,00 m	0,70 m	1,00 m
d	0,116	0,204	0,415	0,058
CD	0,00324	0,00716	2,76495	0,00529
EF	-290,33	-125,52	-0,39	-191,81
ME	61,00	0,40	3,72	0,50
RMSE	782,93	393,29	54,07	485,51
CRM	-4,287	-3,527	0,316	-3,829
EAM	-3,84	-0,04	0,28	-0,05

⁽¹⁾ d = Índice de concordância, CD = Coeficiente de determinação, EF = Eficiência, ME = Erro máximo, RMSE = Raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado, CRM = Coeficiente de massa residual e EAM = Erro absoluto médio. Valores dos índices estatísticos para uma perfeita concordância entre a eficiência dos equipamentos: d = 1, CD = 1, EF = 1, ME = 0, RMSE = 0, CRM = 0 e EAM = 0.

Analisando a figura 3 e os índices estatísticos propostos para detectar as variações proporcionadas pela comparação entre os equipamentos tensiômetro e sonda de nêutrons e tensiômetro e TDR, para as profundidades de 0,70 e 1,00 m (Quadro 4), observou-se que os dados que relacionam K(θ) e a umidade volumétrica para o TDR, para a profundidade de 0,70 m, apresentaram-se mais próximos aos do tensiômetro, enquanto, para a profundidade de 1,00 m (Figura 4), houve maior aproximação dos dados da sonda de nêutrons, em comparação com os do tensiômetro.

CONCLUSÕES

1. As umidades e as condutividades hidráulicas não saturadas obtidas pelo TDR foram mais próximas das obtidas pelo tensiômetro, quando comparadas às da sonda de nêutrons, na profundidade de 0,70 m.

2. Na profundidade de 1,00 m, a sonda de nêutrons mostrou-se mais eficiente na determinação da umidade do solo e da condutividade hidráulica não saturada.

LITERATURA CITADA

- ARYA, L.M.; LEIJ, F.J.; SHOUSE, P.J. & van GENUCHTEN, M.T. Relationship between the hydraulic conductivity function and the particle-size distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:1063-1070, 1999.
- BAKER, J.M. & ALLMARAS, R.R. System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time-domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:1-6, 1990.
- BUCKINGHAM, E. Studies on the movement of soil moisture. *Bur. Soils.*, 38:1-61, 1907.
- CASTRO, L.G. Dinâmica da água em terraços de infiltração. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2001. 104p. (Tese de Doutorado)
- DALTON, F.N. & van GENUCHTEN, M.T. The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma*, 38:237-250, 1986.
- DARCY, H. Les fontaines publiques de la Ville de Dijon. Paris, Victor Dalmont, 1856. 647p.
- DASBERG, S. & DALTON, F.N. Time domain reflectometry field measurements of soil water content and electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:293-297, 1985.
- DIRKSEN, C. Unsaturated hydraulic conductivity. In: SMITH, K.A. & MULLINS, C.E., eds. *Soil analysis: physical methods*. New York, Marcel Dekker, 1991. p.209-269.
- DONG WANG, D.; YATES, S.R. & ERNST, F.F. Determining soil hydraulic properties using tension infiltrometers, time domain reflectometry, and tensiometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62:318-325, 1998.
- DOURADO NETO, D.; JONG VAN LIER, Q.; BORTEL, T.A. & LIBARDI, P.L. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo utilizando o modelo de van Genuchten. *Eng. Rural*, 1:92-102, 1990.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, 1999. 412p.
- GUIBERTO, P.J. Metodologias para a obtenção de parâmetros utilizados em modelos de infiltração da água no solo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1999. 79p. (Tese de Mestrado)
- HERKELRATH, W.N.; HAMBURG, S.P. & MURPHY, F. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. *Water Res. Res.*, 27:857-864, 1991.

- HILLEL, D.A.; KRENTOS, V.K. & STILIANOV, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. *Soil Sci.*, 114:395-400, 1972.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA. Comparison of soil water measurement using the neutron scattering, time domain reflectometry and capacitance methods. Viena, 2000. 162p. (Reunião Técnica da Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture)
- JONG VAN LIER, Q. & LIBARDI, P.L. Variabilidade dos parâmetros da equação que relaciona a condutividade hidráulica com a umidade do solo no método do perfil instantâneo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:1005-1014, 1999.
- LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Simplified field methods for estimating the unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:3-6, 1980.
- MORAES, S.O. Heterogeneidade hidráulica de uma terra roxa estruturada. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1991. 141p. (Tese de Doutorado)
- NADLER, A.; DASBERG, S. & LAPID, I. Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55:938-943, 1991.
- PAULETTO, E.A.; LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A. & MORAES, S.O. Determinação da condutividade hidráulica de solos a partir da curva de retenção de água. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:189-195, 1988.
- PREVEDELLO, C.L. Teoria do fluxo da água em solos não saturados: novos conceitos e aplicações. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1987. 264p. (Tese de Doutorado)
- RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics*, 1:318-333, 1931.
- SAUNDERS, L.C.U.; LIBARDI, P.L. & REICHARDT, K. Condutividade hidráulica da Terra Roxa Estruturada em condições de campo. *R. Bras. Ci. Solo*, 2:164-167, 1978.
- TOMASELLA, J. & HODNETT, M.G. Estimating unsaturated hydraulic conductivity of Brazilian soils using soil-water retention data. *Soil Sci.*, 162:703-712, 1997.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Res. Res.*, 16:574-582, 1980.
- TURATTI, A.L.; VILLAGRA, M.M.; PONCE, J.E.; BACCHI, O.O.S. & REICHARDT, K. Variabilidade espacial do solo e sua implicação na calibração de sondas de nêutrons. *R. Bras. Ci. Solo*, 14:259-262, 1990.
- YOUNGS, E.G. Hydraulic conductivity of saturated soils. In: SMITH, K.A. & MULLINS, C.E. *Soil analysis: physical methods*. New York, Marcel Dekker. 1991. p.161-207.
- van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.
- VILLAGRA, M.M.; MATSUMOTO, O.M.; BACCHI, O.O.S.; MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L. & REICHARDT, K. Tensiometria e variabilidade espacial em terra roxa estruturada. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:205-210, 1988.
- WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. *Applications of soil physics*. New York, Academic Press, 1980. p.319-344.
- WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G. & DAVIS, R.E. Statistics for the evaluation and comparison of models. *J. Geophys. Res.*, 90:8995-9005, 1985.
- ZACHARIAS, S.; HEATWOLE, C.D. & CAKLEY, C.W. Robust quantitative techniques for validating pesticide transport models. *Trans. Am. Soc. Agron. Eng.*, 39:47-54, 1996.