

CALIBRAÇÃO DE SONDA DE NÊUTRONS: AMOSTRAGEM DE SOLO VERSUS TENSIOMETRIA

CALIBRATION OF A NEUTRON PROBE: SOIL SAMPLING AND TENSIOMETRY

Claudia Fernanda Almeida Teixeira¹; Sergio Oliveira Moraes²; Marcia Aparecida Simonete³

RESUMO

A técnica da moderação de nêutrons tem sido utilizada há mais de cinco décadas para a determinação do conteúdo de água no solo. Entretanto, vários aspectos ainda apresentam dificuldades, destacando-se a calibração do equipamento. O objetivo do trabalho foi comparar curvas de calibração para a sonda de nêutrons, obtidas diretamente pela relação entre contagem relativa e umidade volumétrica da amostra e indiretamente pela contagem relativa e potencial mátrico, obtidas por tensiometria e sua relação com a umidade volumétrica através da curva de retenção de água no solo. Para tanto foi montado um experimento em área de um solo classificado como Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico, de Piracicaba, SP. A área experimental foi dividida em duas partes: uma contendo trinta tensiômetros e três tubos de acesso para sonda de nêutrons e outra externamente contendo um tubo de acesso. Para o método direto foi utilizado um conjunto de 7 pares de valores (contagem relativa e umidade volumétrica de amostra coletada na área que contém um tubo) e para o método indireto foi considerado um conjunto de 18 pares de valores

(contagem relativa e potencial mátrico). A utilização de um método para calibração da sonda de nêutrons, utilizando a tensiometria não mostrou, para esse solo, ser uma ferramenta útil para superar as deficiências do método tradicional de calibração. Para estimar a umidade, as curvas de calibração devem ser obtidas para cada camada do perfil do solo.

PALAVRAS-CHAVE: umidade do solo, sonda de nêutrons, calibração.

SUMMARY

The neutron moderation technique has been used for more than five decades to estimate soil water content. However, some aspects of its use remain difficult, especially the calibration. This paper aimed to compare calibration curves for a neutron probe, obtained directly by the relation between the relative count ratio and the volumetric water content of a soil sample and indirectly by the count ratio and the soil water matric potential, obtained by tensiometry and its relation with soil water content using the soil water retention curve. An experiment was set up on an area of a Udox (Oxisol) of Piracicaba,

¹ Engenheira Agrícola - Professora, Universidade Federal de Pelotas/UFPel. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel – Depto de Solos, Caixa Postal 354, CEP 96010-900, Capão do Leão, RS. E-mail: cfteixei@ig.com.br.

² Professor Doutor. Departamento de Ciências Exatas, ESALQ/USP, Caixa Postal 9, 13418-900, Piracicaba, SP. E-mail: somoraes@carpa.ciagri.usp.br.

³ Engenheira Agrônoma – Professora Colaboradora, Universidade do Estado de Santa Catarina/UDESC, Caixa Postal 281, CEP 88520-000, Lages, SC. E-mail: a2mas@cav.udesc.br

Brazil (22° 42' 30" S e 47° 38' 00" W). The experimental area was divided in two parts: one containing 30 tensiometers and 3 access tubes for neutron probes, and another one containing one access tube. For the direct method a data set of 7 pairs of values for relative count ratio and volumetric water content was obtained in the area with one access tube, and for the indirect method, a data set of 18 pairs of values was used (relative count ratio and matric potential). The utilization of a method for neutrons probe calibration, using tensiometer didn't show, for this soil, be useful to overcome the calibration traditional method. It is shown that calibration curves should be obtained for each soil layer in order to well estimate soil water contents.

KEY WORDS: soil water content, neutron probe, calibration.

INTRODUÇÃO

O conteúdo de água no solo é uma variável utilizada em estudos que envolvem agricultura, hidrologia e meteorologia, entre outros. Na agricultura essa informação é necessária para aplicações que incluem aumento da produção agrícola e planejamento da irrigação. Dentro deste contexto seu monitoramento torna-se importante para a obtenção, por exemplo, da função condutividade hidráulica do solo não saturado ($K(\theta)$). Dentre as várias técnicas para a obtenção da umidade do solo destacam-se o método gravimétrico, considerado padrão, sendo demorado, destrutivo e não permite a repetição da amostragem no mesmo local; a reflectometria no domínio do tempo (TDR) (TOPP et al., 1980), que utiliza a relação entre a constante dielétrica do solo e a umidade volumétrica e a técnica da moderação de nêutrons, que utiliza a relação de dependência entre o conteúdo volumétrico de água no solo e a contagem relativa (contagem solo/contagem no padrão). De forma resumida a sonda de nêutrons consiste de uma fonte radioativa que emite nêutrons rápidos, um detector de nêutrons lentos e um pré-amplificador, cujo sinal é conduzido ao sistema eletrônico de contagem. Desta forma, nêutrons

rápidos (alta energia) são emitidos por esta fonte, interagindo com o meio ao redor. Através das colisões, principalmente com os hidrogênios presentes na água, nêutrons rápidos se tornam lentos (perdem energia) e retornam ao sistema de contagem, fornecendo a taxa de contagem, que, por sua vez, é relacionada com o teor de água do solo. Esta técnica tem sido utilizada há mais de cinco décadas para a determinação do conteúdo de água no solo, mas vários aspectos ainda apresentam dificuldade, tais como determinação da umidade em camadas superficiais do solo, riscos com o manuseio por tratar-se de material radioativo e a calibração do equipamento, sendo esta última talvez a mais crítica das desvantagens dessa técnica.

Na literatura são encontrados três métodos para a calibração: teórica, em tanques e "in situ" (GREACEN, 1981; GARDNER et al., 1991), sendo este o mais comum principalmente em solos com heterogeneidade vertical. Alguns pontos frágeis deste método são a obtenção de faixas de umidade volumétrica do solo que garantam um bom coeficiente de correlação (TURATTI et al., 1990; SANTOS et al., 1999) e ao mesmo tempo não destruam o local de amostragem; a necessidade da retirada de várias amostras de solo para a determinação da umidade gravimétrica; e o volume amostrado pela sonda não constitui o mesmo da amostra coletada (BACCHI et al., 1998). Para Falleiros (1994) a amostragem é o principal problema de uma calibração, onde a mesma amostra de solo exposta à sonda de nêutrons deve, em princípio, ser amostrada pelo método gravimétrico para a obtenção do valor de umidade volumétrica. Aliado a isso existe ainda a influência da variabilidade espacial (TURATTI et al., 1990), decorrente da umidade gravimétrica e da densidade do solo.

Numa tentativa de reduzir os problemas acima citados, com a diminuição do número de pontos amostrados e ao mesmo tempo apresentar bons coeficientes de correlação, Santos et al. (1999) utilizaram uma metodologia considerando somente pontos extremos do conteúdo de água do solo (úmido e seco) e encontraram que essa

calibração simplificada apresentou melhor estimativa do conteúdo de água no solo com maior rapidez e simplicidade, com coeficientes de determinação iguais ou próximos a unidade. É questionável, no entanto, a afirmação dos autores com relação à precisão do método utilizado, pois são considerados apenas dois pontos extremos de umidade e por eles traçado um segmento de reta.

Outro aspecto importante a ser considerado na utilização da sonda de nêutrons é a sua esfera de influência, que varia em função do conteúdo de água. Para cada umidade, a sonda amostra diferentes volumes de solo e como o número de nêutrons lentos detectados pelo sistema de contagem varia em função do conteúdo de água, a esfera de influência será maior em solos secos do que em solos mais úmidos. Esse fato poderá acentuar os problemas causados por sua utilização em camadas superficiais do solo, podendo ocorrer a fuga de nêutrons para a atmosfera.

Dada então a necessidade de conciliar curvas de calibração com bons coeficientes de determinação e amostragem do teor de água no mesmo local, com possibilidade de reamostragens ao longo do tempo, objetivou-se propor uma metodologia de calibração da sonda de nêutrons a partir da tensiometria. Se confirmada tal possibilidade, isto é, de potencial mátrico versus contagem relativa e de umidade volumétrica versus potencial mátrico, poder-se-ia correlacionar umidade volumétrica versus contagem, obtendo-se assim a calibração em termos dessas duas variáveis. Convém ressaltar que uma dificuldade inerente ao método aqui proposto poderia ser o não funcionamento do tensiômetro em umidades muito baixas ($> 0,8$ atm), o que, indiretamente será detectado pela referida metodologia.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado próximo ao Posto Meteorológico do Departamento de Ciências Exatas da ESALQ/USP, Piracicaba/SP, Brasil, cujas coordenadas geográficas são: $22^{\circ} 42'30''$ de latitude sul, $47^{\circ} 38'00''$ de longitude

oeste e a 546 m de altitude. O solo foi classificado como Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico (EMPRESA, 1999). Alguns dados referentes as características do solo em estudo encontram-se na Tabela 1.

A parcela experimental constituiu-se de duas partes: um volume de solo com $7,07 \text{ m}^2$ e 1,30 m de profundidade confinado por folha de flandres de 1,00 m de altura e 1,5 m de raio, contendo no seu interior 3 baterias de tensiômetros (totalizando 30 instrumentos) e três tubos de acesso para sonda de nêutrons e a outra parte localizada a dois metros da delimitação da folha, contendo um outro tubo de acesso. As profundidades de instalação dos equipamentos foram de 0,10 em 0,10 m, sendo a primeira profundidade a 0,40 m da superfície. Desta forma evitou-se a utilização da sonda de nêutrons em camadas superficiais e também qualquer efeito de camadas compactadas pelo pisoteio e a influência da temperatura nas medições. As leituras com a sonda de nêutrons foram realizadas nas mesmas profundidades citadas acima.

A sonda utilizada foi uma 503 Hydroprobe, marca CPN, munida de uma fonte de $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ de atividade radioativa de 1,85 GBq e tempo de contagem de 30 s. As curvas de retenção de água para cada profundidade de instalação dos tensiômetros e leitura da sonda foram obtidas conforme descrito em Moraes (1991). Foram coletadas três amostras indeformadas por profundidade, utilizando-se mesas de tensão e câmaras de pressão de Richards, nas tensões de 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 33 e 50 kPa. Os dados de umidade volumétrica e potencial mátrico foram ajustados ao modelo de VAN GENUCHTEN (1980), pelo programa SWRC (DOURADO NETO et al., 1990). O programa determina os parâmetros empíricos do modelo minimizando a soma dos quadrados dos desvios residuais em relação a estimativa da umidade, para a confecção da curva de retenção da água no solo.

Para a elaboração das curvas de calibração da sonda de nêutrons utilizaram-se duas metodologias: a primeira obtida diretamente pela relação entre a contagem relativa e a

umidade volumétrica (convertida à base de volume a partir da umidade gravimétrica e densidade do solo) da amostra coletada, por ocasião da contagem (sete leituras de sonda de nêutrons e coletas de amostras deformadas de solo), e a segunda indiretamente pela contagem relativa e potencial mátrico obtido por tensiometria e sua posterior relação com a umidade volumétrica através da curva de retenção de água no solo (dezoito leituras de sonda e tensiômetros para obtenção da umidade volumétrica). As curvas de calibração, para os métodos direto e indireto nas diferentes camadas do solo, foram obtidas através da regressão linear entre a contagem relativa da sonda de nêutrons e o conteúdo volumétrico de água no solo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de calibração da sonda de nêutrons para cada camada de solo, relacionando a umidade volumétrica em função da contagem relativa apresentaram coeficientes de determinação (r^2) que variaram de 0,67 a 0,99 para o método direto e 0,82 a 0,99 para o método indireto (Figuras 1 e 2). O coeficiente de determinação expressa numericamente tanto a "força" quanto o sentido da correlação entre duas variáveis e não a exatidão das mesmas, podendo ser classificada quanto ao seu grau (LEVIN, 1987). Os dados apresentados mostram uma correlação positiva entre as variáveis, uma vez que à medida que o solo vai secando, a contagem relativa vai diminuindo, para ambos os métodos avaliados.

Para o método direto, Prevedello (1987), no mesmo solo e profundidades, encontrou valores de coeficiente de determinação que variaram de 0,51 a 0,89. Destaca-se nessa observação, a camada de 0,40 m (Figura 1), onde se verificou o menor coeficiente (0,67), sendo, no entanto, maior que o obtido pelo autor (0,51). Prevedello (1987), para a mesma camada em estudo, atribuiu esse menor valor a problemas de variabilidade natural do solo nessa profundidade, já que o número de pontos utilizados foi suficientemente grande para não pôr em dúvida, a

confiabilidade do conjunto de pontos obtidos. Também ressalta a possibilidade de ter havido a interferência de outros constituintes do solo, como a matéria orgânica, principalmente em camadas superficiais, na moderação dos nêutrons rápidos. Com relação aos dados de matéria orgânica obtidos, por ocasião da implantação experimental (Tabela 1), observa-se que o maior valor encontrado também refere-se a profundidade de 40 cm (18 g kg^{-1}), enquanto as demais apresentaram teores praticamente constantes ao longo do perfil.

Analisando-se a amplitude da umidade volumétrica obtida para todas as profundidades, pode-se verificar que foi bastante restrita, variando de 0,32 a $0,44 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, para o método direto, enquanto que Turatti et al. (1990), para o mesmo solo, encontraram valores que variaram de 0,26 a $0,43 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Os autores também utilizaram um conjunto de 6 pares de dados, o que indica que haveria a possibilidade de estender-se o conjunto de dados obtidos, desde que se aguardasse um tempo maior para o secamento. É importante ressaltar que o intervalo de funcionamento do tensiômetro de zero até aproximadamente 0,8 da pressão atmosférica (REICHARDT, 1990) poderia ser um fator limitante para obtenção de pontos correspondentes a um baixo teor de água, mas no presente estudo tal restrição não foi verificada durante as faixas de medição.

Observando-se os valores dos coeficientes angulares das equações de reta para o método direto de calibração (Tabela 2), verifica-se que os valores numéricos apresentam um leve acréscimo com o aumento da profundidade, com um mínimo de 0,178 e um máximo de 0,741. A variação encontrada é relativamente maior do que a encontrada por Prevedello (1987), no mesmo solo, com uma sonda de fabricação francesa, marca Nardeaux, modelo Solo-25. O autor encontrou um mínimo de 0,118 e um máximo de 0,162, variação considerada muito pequena, podendo então, para propósitos práticos, utilizar somente uma curva para qualquer profundidade do perfil. O interesse na análise dos coeficientes angulares é que se forem iguais para as curvas

das várias camadas do perfil, indicariam que bastaria uma única determinação com a sonda de nêutrons e coleta de amostra para obter-se a curva de calibração desejada, uma vez que seriam paralelas, tratando-se portanto, de uma simples translação. No caso em estudo como as diferenças encontradas foram maiores, há a necessidade da construção de curvas de calibração para cada profundidade de interesse, fato confirmado por vários autores (FALLEIROS, 1994; SANTOS et al., 1999).

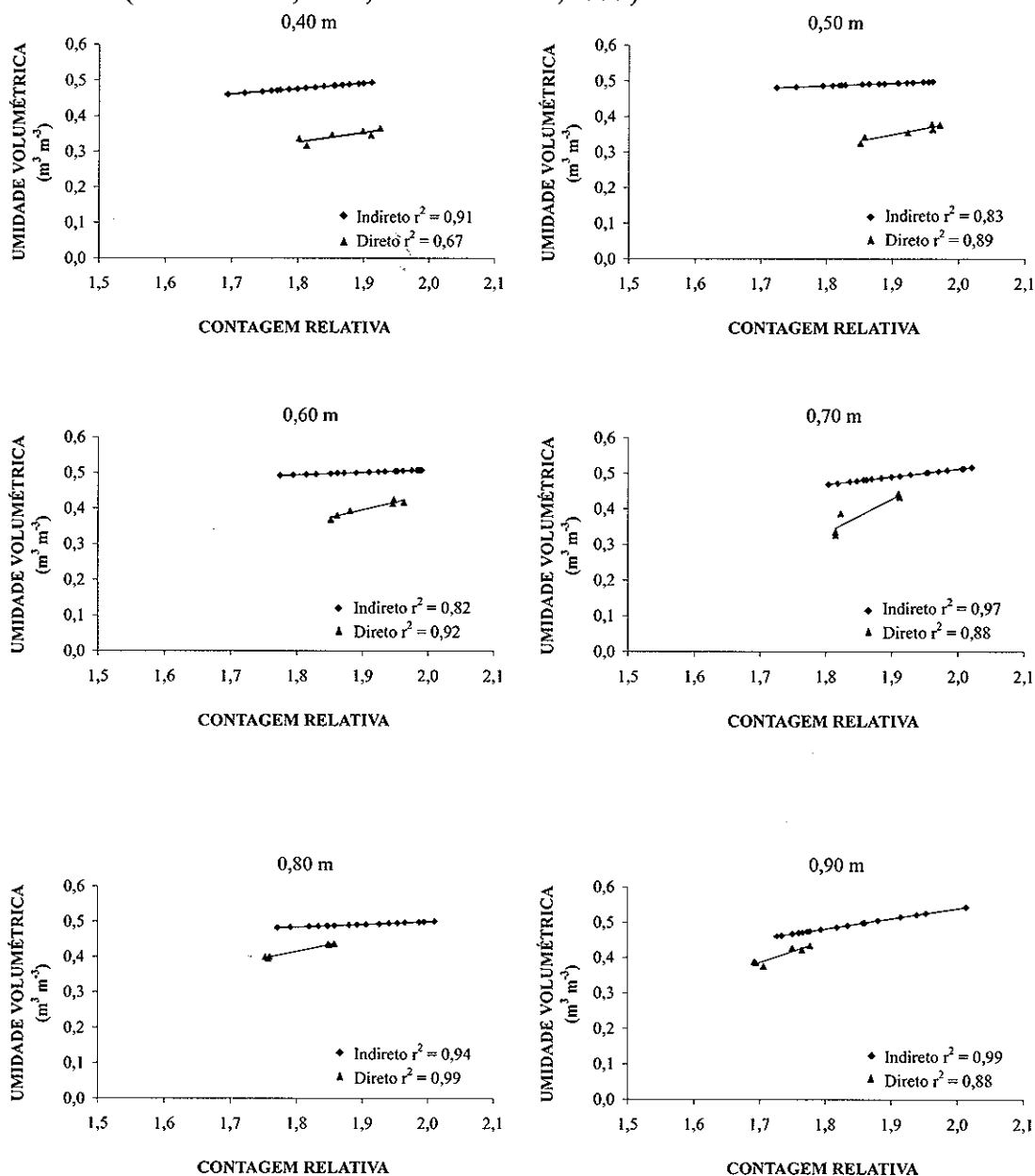


Figura 1 – Curvas de calibração para sonda de nêutrons obtidas pelos métodos direto (contagem relativa-CR versus umidade volumétrica obtida por amostragem) e indireto (CR versus potencial mátrico obtido por tensiometria e posterior relação com umidade volumétrica via curva de retenção), para as profundidades de 0,40m e 0,9m do Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico.

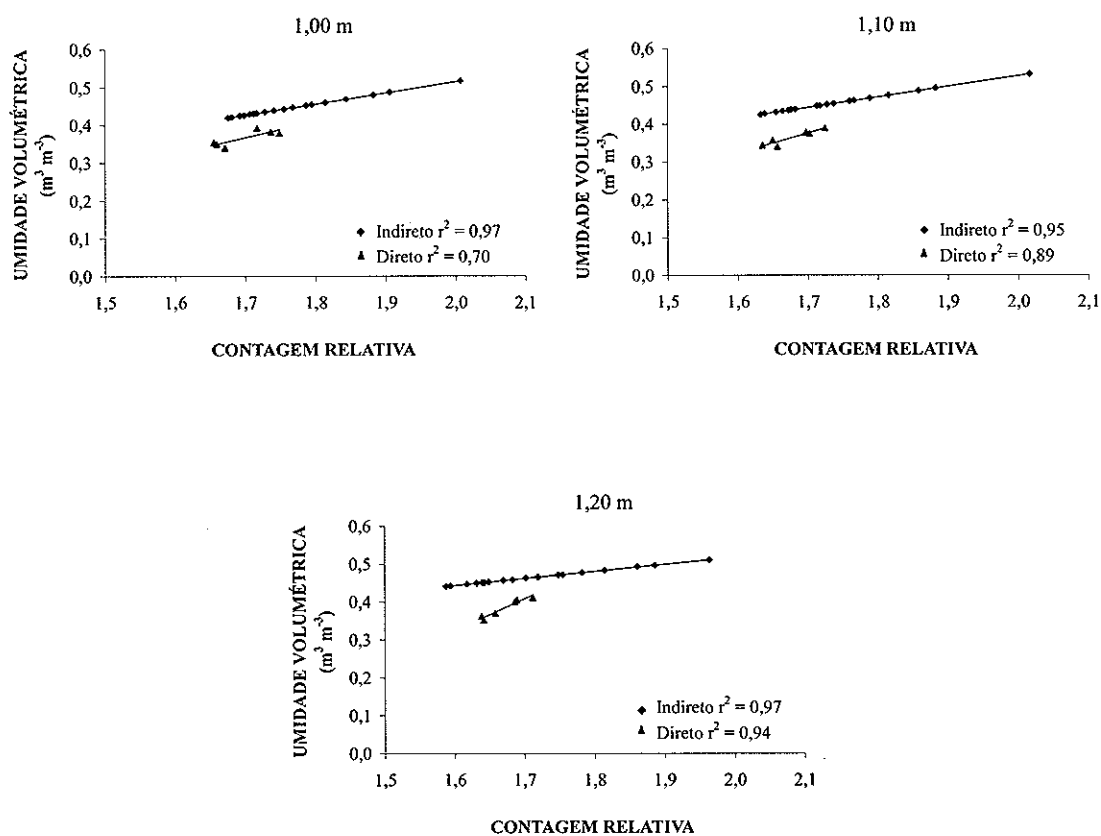


FIGURA 2. Curvas de calibração para sonda de nêutrons obtidas pelos métodos direto (contagem relativa-CR versus umidade volumétrica obtida por amostragem) e indireto (CR versus potencial mátrico obtido por tensiometria e posterior relação com umidade volumétrica via curva de retenção), para as profundidades de 1,00m a 1,20m do Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico.

TABELA 1. Dados de granulometria (areia, silte e argila), matéria orgânica (M.O.) e densidade do solo (ds), para as diferentes camadas do Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico

Camada (m)	Areia	Silte	Argila	M.O.	ds
	(g kg ⁻¹)				(kg m ⁻³)
0,00 – 0,40	260	160	580	18	1320
0,40 – 0,50	180	140	680	8	1240
0,50 – 0,60	180	140	680	8	1210
0,60 – 0,70	210	140	650	5	1310
0,70 – 0,80	150	140	710	3	1280
0,80 – 0,90	230	140	630	5	1260
0,90 – 1,00	170	180	650	5	1250
1,00 – 1,10	210	140	650	5	1240
1,10 – 1,20	190	160	650	8	1310

TABELA 2. Equações de calibração da sonda de nêutrons para os métodos direto (contagem relativa-CR versus umidade volumétrica obtida por amostragem) e indireto (CR versus potencial mátrico obtido por tensiometria e posterior relação com umidade volumétrica via curva de retenção), para as diferentes camadas do Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico

Camada (m)	Equação de calibração ⁽¹⁾	
	Método Direto	Método Indireto
0,00 – 0,40	? = 0,178CR + 0,012	? = 0,153CR + 0,201
0,40 – 0,50	? = 0,253CR – 0,128	? = 0,071CR + 0,359
0,50 – 0,60	? = 0,393CR – 0,350	? = 0,070CR + 0,368
0,60 – 0,70	? = 0,448CR – 0,438	? = 0,218CR + 0,076
0,70 – 0,80	? = 0,608CR – 0,683	? = 0,075CR + 0,350
0,80 – 0,90	? = 0,741CR – 0,879	? = 0,289CR – 0,038
0,90 – 1,00	? = 0,410CR – 0,330	? = 0,292CR – 0,070
1,00 – 1,10	? = 0,406CR – 0,316	? = 0,277CR – 0,026
1,10 – 1,20	? = 0,384CR – 0,257	? = 0,183CR + 0,150

¹ é a umidade volumétrica (m³ m⁻³) e CR é a contagem relativa (CR = contagem no solo/contagem no padrão).

Estudando a variabilidade de medidas de tensiômetro no mesmo solo e sonda modelo Solo-25, utilizando a água como padrão Villagra (1988), encontrou, para a camada de 0,25 m, uma equação do tipo linear com coeficiente angular de 1,042, diferindo, portanto, da encontrada por Prevedello (1987), que foi do tipo polinomial de segunda ordem. Considerando-se o método indireto de calibração nota-se que os coeficientes angulares foram inferiores aos obtidos para o método direto, com um mínimo de 0,070 e um máximo de 0,292.

Da mesma forma para o coeficiente linear, método direto, observa-se uma grande variação em comparação com os valores obtidos por Prevedello (1987). O valor numérico mínimo encontrado foi de -0,879 e o máximo +0,012, enquanto que os obtidos pelo referido autor foram -0,145, mínimo, e 0,022, máximo.

Considerando o coeficiente de determinação como critério para a análise das curvas de calibração (TURATTI et al., 1990; SANTOS et al., 1999), poder-se-ia afirmar que, de modo geral, os dois métodos, para todas as profundidades, apresentaram coeficientes que indicariam possibilidade de utilização de todas as curvas de calibração, apesar de alguns autores considerarem valores de 0,97 a 0,99 como capazes de proporcionar excelente estimativa da umidade do solo. Entretanto, a Figura 1 mostra que existem diferenças entre os resultados dos métodos direto e indireto, para as nove camadas estudadas. As diferenças estão relacionadas principalmente a inclinação da reta obtida no método indireto em relação ao direto, faixas e valores de umidade abrangidas por um e outro método e número de pontos obtidos.

Com relação à inclinação verifica-se, de modo geral, que os métodos não apresentaram paralelismo entre as retas, com exceção das profundidades de 0,40 e 1,00 m que mostraram possuir uma mesma inclinação. Considerando as faixas de umidade observa-se que somente para as profundidades de 0,80, 0,90 e 1,00 m os valores de umidade do método direto não foram abrangidos pelos valores alcançados pelo método indireto, ou seja, os valores obtidos de umidade

volumétrica não foram coincidentes. A amplitude de umidade conseguida com o método direto, tomado como padrão, provavelmente acentuou as diferenças encontradas entre os métodos, e com menor intensidade o número de pontos utilizados. Se as faixas de umidade, obtidas para esse método, fossem maiores, provavelmente haveria mais subsídios para inferir sobre a aplicabilidade do método indireto de calibração da sonda de nêutrons.

De acordo com Turatti et al. (1990) estas diferenças encontradas poderiam estar associadas a variabilidades espacial, decorrentes principalmente dos dados de umidade gravimétrica e da densidade do solo. Os dados de densidade do solo (Tabela 1) não mostram grandes variações entre as profundidades, o que evidencia que talvez os dados de umidade sejam os principais causadores de variabilidade. Isto é comum, pois o volume de solo que a sonda amostra é diferente daquele amostrado para a determinação da umidade gravimétrica, o que consiste de uma grande vantagem do método aqui proposto sobre o convencional, ou seja, a possibilidade de calibração a partir do uso da tensiometria.

Para quantificar a intensidade das diferenças entre os métodos utilizados realizou-se uma análise estatística robusta, isto é, independente do conhecimento da distribuição de probabilidades subjacente, constituída pelos seguintes índices: 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 as curvas obtidas pelos dois métodos resultaria em $d = CD = EF = 1$ e $ME = RMSE = CRM = EAM = 0$.

A análise desses índices mostra que o índice de concordância $d=1$ não foi atingido em nenhuma camada, sendo que as camadas de 0,60 a 1,00 m e a camada de 1,20 m apresentaram d maior do que 0,7 (Tabela 3). Para os índices CD e EF , as camadas não apresentaram sequer

valores próximos a 0,5, mas mesmo assim a camada de 0,90 m foi a que apresentou melhor resultado. Para os índices *ME*, *EAM*, *RMSE* e *CRM* as camadas que contêm as profundidades 0,80, 0,90, 1,00, 1,10 e 1,20 m tiveram melhor desempenho, alcançando valores mais próximos de 0, quando comparadas as demais. Portanto,

das nove camadas analisadas, a camada de 0,90 m foi a que obteve uma maior concordância com os índices estudados e a camada de 0,50 m o pior resultado. Apesar do método indireto apresentar coeficientes de determinação considerados "bons", a sua utilização deve ser feita com restrição.

TABELA 3. Índice de concordância (*d*), 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*) obtidos para cada camada do solo em estudo

Prof. (m)	Índice						
	d	CD	EF	ME	RMSE	CRM	EAM
0,40	0,121	0,006	-173,325	0,150	41,48	-0,415	-0,143
0,50	0,051	0,012	-94,254	0,176	47,47	-0,474	-0,159
0,60	0,758	0,126	-2,484	0,123	26,22	-0,260	-0,103
0,70	0,772	0,168	-1,574	0,122	23,22	-0,226	-0,089
0,80	0,897	0,277	0,142	0,085	16,47	-0,163	-0,068
0,90	0,910	0,313	0,306	0,069	13,58	-0,134	-0,055
1,00	0,720	0,111	-3,387	0,065	16,09	-0,161	-0,059
1,10	0,618	0,074	-7,048	0,084	20,19	-0,201	-0,074
1,20	0,794	0,173	-1,314	0,093	18,50	-0,181	-0,070

CONCLUSÕES

1. A utilização de método alternativo de calibração da sonda de nêutrons, que relaciona a contagem relativa e potencial mátrico obtido por tensiometria e sua posterior relação com a umidade volumétrica através da curva de retenção de água no solo, não mostrou, para esse solo, ser uma ferramenta útil para superar as deficiências do método tradicional de calibração, devendo, portanto, ser utilizado com restrições.
2. A calibração da sonda de nêutrons, para o solo estudado, deve ser realizada em cada profundidade de interesse.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K.; CALVACHE, M. **Sondas de neutrones y gamma y sus aplicaciones en agronomia**. Viena: International Atomic Energy Agency, 1998. 94p. (Curso de Treinamento)
- 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. **Engenharia Rural**, v.1; p.92-102, 1990.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA-CNPS, 412 p. 1999.

FALLEIROS, M.C. **Medida da umidade do solo com sonda de nêutrons**. 1994. 115p. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

GARDNER, C.M.K.; BELL, J.P.; COOPER, J.D.; DEAN, T.J.; HODNETT, M.G. Soil Water Content. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C.E., (Ed.) **Soil analysis: physical methods**. New York: Marcel Dekker, 1991. p.1-65.

GREACEN, E.L. **Soil water assessment by the neutron method**. Adelaide: CSIRO/Division of soils, 1981. 140p.

LEVIN, J. **Estatística aplicada a ciências humanas**. 2 ed. São Paulo: Harbra, 1987. 392p.

MORAES, S.O. **Heterogeneidade hidráulica de uma terra roxa estruturada**. 1991. 141p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

PREVEDELLO, C.L. **Teoria do fluxo da água em solos não saturados: novos conceitos e aplicações**. 1987. 264p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188p.

SANTOS, R.F. DOS; CARLESSO, R.; BOAS, M.A.V. Calibração simplificada de sonda de nêutrons para a determinação do conteúdo de água no solo. **Revista de Agricultura**, v.74, n.2, p.201-216, 1999.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water

content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v.16, p.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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.14, p.259-262, 1990.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.12, p.205-210, 1988.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v.90, n.5, p.8995-9005, 1985.

ZACHARIAS, S.; HEATWOLE, C.D.; COAKLEY, C.W. Robust quantitative techniques for validating pesticide transport models. **Transactions of the ASAE**, v.39, n.1, p.47-54, 1996.