

Calibração de duas sondas de nêutrons em condições de campo e laboratório

Antonio Carlos S. da Costa¹ e Rogério Teixeira de Faria^{2*}

¹Área de Solos, Instituto Agronômico do Paraná-Iapar, atualmente Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá-Paraná, Brazil. ²Instituto Agronômico do Paraná-Iapar, Rodovia Celso Garcia Cid, Km 375, 86001-900, Londrina-Paraná, Brazil. *Author for correspondence.

RESUMO. Foram testadas duas metodologias para a calibração de duas sondas de nêutrons, modelo CPN 503DR, que determina a umidade do solo, e CPN 501DR, que determina a umidade e a densidade do solo. A utilização de tambores, para acondicionar o solo na calibração da sonda de nêutrons em condições de laboratório, foi apropriada para os latossolos de textura argilosa. No latossolo de textura média, houve indícios de perdas de nêutrons pelas paredes do tambor. As equações de regressão linear, obtidas a campo e no laboratório para os latossolos de textura muito argilosa, tiveram coeficientes angulares semelhantes ao coeficiente angular da equação fornecida pelo fabricante, que, embora não determine o valor real da umidade do solo, pode ser útil na determinação de variações da umidade volumétrica. O modelo CPN DR501 apresentou menor sensibilidade na determinação da umidade volumétrica em relação ao modelo CPN 503DR.

Palavras-chave: latossolos, métodos, umidade volumétrica.

ABSTRACT. Calibration of two neutron probes in field and laboratory conditions.

Two different methods were used to calibrate two neutron probes: model CPN 503DR which measures soil water content and CPN 501DR for soil density and water content. The use of drums to hold the soil in the calibration of neutron probe in laboratory condition was appropriate for high clay-content latosol. For low clay-content latosol, a loss of neutrons through the drums was detected. The linear regression equations, determined in both on-field and laboratory conditions for high clay-content latosols, presented slope coefficients similar to the one provided by the manufacturer which, though not determining the real value of soil water content, may be useful to detect the variations of water content in the field. The model CPN 501DR showed lower sensibility to determine the soil water content than the model CPN 503DR.

Key words: latosols, methods, soil water content.

A utilização da sonda de nêutrons como um equipamento para medida da umidade volumétrica é uma prática com mais de 47 anos (Gardner e Kirkhan, 1952; van Bavel *et al.*, 1956). No entanto, sua utilização em estudos de movimentação da água (Libardi *et al.*, 1979; Saunders *et al.*, 1978,) ainda apresenta problemas na calibração do equipamento (Shirazi e Isobe, 1976; Elder e Rasmussen, 1994; Evett e Steiner, 1995; Kirda e Reichardt, 1992; Reichardt *et al.*, 1997). As vantagens da utilização do método de moderação de nêutrons são: é muito pouco destrutivo, não há contato da fonte radioativa com o meio, é rápido e possibilita medidas repetidas no mesmo local, integrando um volume de solo ou do meio onde está sendo efetuada a determinação. Como desvantagens deste método, pode-se citar o

fato de a sonda de nêutrons ser um equipamento importado e apresentar radioatividade, necessitando de pessoal técnico especializado para sua operação e exigir rígido controle dos níveis de radioatividade (Cameron, 1970).

O princípio básico de utilização do equipamento é que há uma correlação estreita entre a quantidade de nêutrons moderados no solo, medidos no aparelho, e a quantidade de hidrogênio presente no solo (van Bavel *et al.*, 1956). Como há outras formas de hidrogênio no solo além do presente na molécula de água, como na matéria orgânica e nos minerais de argila, (Babalola, 1978), a umidade do solo só é bem determinada, se estas outras fontes forem pequenas, conhecidas ou invariáveis com o tempo. Além do hidrogênio,

outras características do solo também afetam a determinação da umidade, principalmente a densidade do solo (Gornat e Goldberg, 1972) e, em menor importância, sua composição química (Elder e Rasmussen, 1994). Outros fatores que influem na medida da umidade volumétrica são a espessura e o material do tubo de acesso (Encarnação *et al.*, 1991), perda de nêutrons pela superfície do solo (Lawless *et al.*, 1963), presença de pedras (Kirda e Reichardt, 1992), espaços vazios no solo provocado por animais ou plantas e a presença de água no tubo de acesso (Cameron, 1970). Mais recentemente, a variabilidade espacial (Turatti *et al.*, 1990) e temporal (Reichardt *et al.*, 1997) tem sido considerada como mais um fator que afeta a calibração do equipamento (Kirda e Reichardt, 1992). Solos que apresentam anisotropia nas suas características físicas (textura, densidade, porosidade) e morfológicas (presença de horizontes diagnósticos Bt, Bh, Bhi, etc.) podem dificultar a calibração e o uso do equipamento a campo (Encarnação *et al.*, 1991). Desse modo, a utilização da sonda de nêutrons depende da obtenção da equação de regressão relacionando a contagem relativa (CR = contagem-solo/contagem-padrão) com a umidade volumétrica (θ). Uma equação do primeiro grau da forma $CR = a\theta + b$ é a que tem sido mais utilizada na literatura para expressar esta relação (Babalola, 1978; Carneiro e De Jong, 1985; Rawls e Asmussen, 1973; Shirazi e Isobe, 1976).

Os principais métodos de calibração da sonda de nêutrons são dois: (a) determinação simultânea, no campo, da umidade volumétrica e da contagem relativa de nêutrons em diferentes conteúdos de água e (b) utilização de grandes tambores de solo com densidade específica e diferentes conteúdos de água. O primeiro método implica em muitas amostragens e contagens de nêutrons, onde a variabilidade espacial das características do solo (Turatti *et al.*, 1990; Kirda e Reichardt, 1992, Reichardt *et al.*, 1997) pode determinar uma baixa exatidão dos dados (Rawls e Asmussen, 1973). O segundo método é tedioso e laborioso e exige um cuidado muito grande no preenchimento dos tambores. A equação da sonda fornecida pelo fabricante é elaborada pelo método do tambor, determinando somente dois pontos, para um solo apenas, um em solo seco e outro saturado, para estabelecer a relação linear entre a umidade volumétrica e a contagem relativa dos nêutrons (CPN, 1984). O objetivo deste trabalho foi a obtenção das equações de calibração de duas sondas de nêutrons, para três latossolos do Estado do Paraná, sob condições de campo e de laboratório, e

sua comparação com as equações fornecidas pelo fabricante.

Material e métodos

Foram utilizados três latossolos representativos de diferentes regiões do Estado do Paraná. O latossolo vermelho-escuro textura média (LE1) é formado a partir do Arenito Caiuá e ocorre num relevo plano suavemente ondulado, muito intemperizado, predominante na região noroeste do estado. O latossolo vermelho-escuro textura muito argilosa (LE2) é formado a partir de resíduos intemperizados de filitos, da Série Acungui e ocorre num relevo suavemente ondulado, predominante na região sudeste do Estado. A classe latossolo vermelho-escuro ocupa uma área que representa 19,15% da área do Estado (Embrapa, 1984). O latossolo roxo de textura muito argilosa (LR), formado a partir de meláfios e basaltos do derrame do Trapp, predominando na Região norte do Estado, ocupa uma área que representa 14,63% da área do Estado (Embrapa, 1984). Os latossolos foram amostrados nas estações experimentais do Instituto Agrônomo do Paraná-Iapar; o LE1 na estação de Paranavaí; o LE2 na estação de Ponta Grossa e o LR na estação de Londrina. Em cada uma das estações experimentais, foram selecionadas áreas representativas desses solos para sua caracterização física, calibração das sondas de nêutrons em condições de campo e retirada de amostras de solo para elaboração das curvas de calibração das sondas em condições de laboratório. Nas áreas escolhidas, foram abertas trincheiras (1 x 2 x 2m) de onde foram retiradas amostras de solo de estrutura indeformada, com cilindros de aço de 100cm³, nas profundidades de 25, 55, 85, 115 e 145cm para determinação da densidade do solo (D), e amostras de estrutura deformada, nas mesmas profundidades, para determinação da granulometria e da densidade das partículas (Dp). A granulometria foi determinada pelo método da pipeta (Pauletto, 1978) e a densidade de partículas pelo método do picnômetro (Blake, 1965). A porosidade total (P) foi determinada, indiretamente, através da densidade do solo e da densidade das partículas, utilizando a equação:

$$P\% = (1 - (D / D_p)) 100 \quad (1)$$

Um volume de 5m³ de solo foi retirado da camada de 30-120cm para calibração das sondas em condições de laboratório. A camada de 0-30cm foi evitada por geralmente conter alta percentagem de matéria orgânica (Lawless *et al.*, 1963), que poderia superestimar os valores da contagem dos nêutrons moderados (Shirazi e Isobe, 1976). As sondas utilizadas foram fabricadas pela Campbell Pacific

Nuclear-CPN, Pacheco-Califórnia. O modelo CPN 501DR determina a umidade volumétrica (fonte de Am-Be) e a densidade do solo (fonte de Cs), sendo mais robusta e pesada, pois possui uma blindagem de chumbo, além da parafina silicatada com alta densidade (CPN, 1984). O modelo CPN 503DR tem uma fonte radioativa de Am-Be, determina somente a umidade volumétrica do solo e possui como blindagem somente parafina silicatada (CPN, 1984).

A elaboração das curvas de calibração dos equipamentos foi efetuada em condições de laboratório e em condições de campo. Em condições de laboratório, amostras de solo da camada de 30-120cm foram acondicionadas em tambores de ferro de 57cm de diâmetro por 85cm de altura. O solo foi retirado do campo, peneirado e disposto nos tambores, em camadas, simulando as condições de densidade do solo obtidas no campo. O solo foi disposto em camadas de 5cm e, em seguida, compactado para minimizar variações de densidade do solo no tambor. Foram determinadas as contagens relativas (CR = contagem no solo/contagem-padrão) em diferentes condições de umidade, desde solo muito úmido até solo seco ao ar. Utilizou-se um tubo de alumínio (48,26mm de diâmetro interno e 1,27mm de espessura) para acesso à fonte de nêutrons rápidos. Este tubo foi instalado no centro do tambor. As medidas de contagem relativa de nêutrons foram obtidas nas profundidades de 25 e 50cm a partir da superfície do tambor, durante 32s, com três repetições por profundidade. Após estas determinações, foram retiradas amostras de solo em triplicata, utilizando-se cilindros de Kopeck de 100cm³, para determinação da umidade volumétrica nas mesmas profundidades. As amostras foram pesadas e levadas à estufa (105°C, por 24 horas), para determinação da umidade gravimétrica (U) e da densidade do solo (D). A umidade volumétrica (θ) foi obtida através da equação:

$$\theta\% = 100 U D \quad (2)$$

A partir dos valores médios de contagens relativas (CR) e de umidade volumétrica (θ), foram obtidas as equações de regressão linear da forma:

$$CR = a \theta + b \quad (3)$$

A calibração das sondas em condições de campo foi feita instalando-se três tubos de alumínio numa parcela de 3x3 m até a profundidade de 150cm. A área foi cercada com tábuas enterradas 15cm no solo. Adicionou-se água à parcela até a saturação do perfil do solo. A saturação foi atingida quando não havia alteração nos valores de contagem relativa, obtidos

em determinações realizadas nas profundidades de 25, 55, 85 e 115cm. Após a saturação, a parcela foi coberta com um plástico, feitas leituras de contagens relativas com a sonda e determinações simultâneas de umidade gravimétrica nas profundidades estabelecidas, por um período de trinta dias, cobrindo, assim, a faixa de maior variação da umidade do solo em condições de campo. Foram retiradas amostras de solo para determinação da umidade gravimétrica, em triplicata, com um trado holandês, utilizando solo 5cm acima e 5cm abaixo da profundidade estabelecida, de forma a se ter uma amostra média de umidade, correspondendo ao volume de solo abrangido pela sonda (CPN, 1984). O cálculo da umidade volumétrica nas diferentes profundidades foi efetuado com a equação (2). Com estes dados e os de contagem relativa (CR), foram obtidos os coeficientes (a, b) das equações de regressão linear da sonda nas condições de campo. Além das equações de regressão foram determinados seus coeficientes de correlação (r), o erro-padrão da estimativa e a significância dos resultados no nível de 1% pelo teste F. As equações fornecidas pelo fabricante (CPN, 1984), citadas no trabalho, foram utilizadas e comparadas com as equações obtidas em condições de campo e laboratório.

Resultados e discussão

As características físicas dos solos revelam que o LE1 de Paranavai é um solo de textura média com teor de areia entre 81% e 83%, apresentando grande uniformidade textural em profundidade (Tabela 1). É um solo bastante permeável, homogêneo, sem camadas de impedimento, com densidade do solo variando de 1,48 a 1,61gcm⁻³ e porosidade total (P) em torno de 49%, muito inferior aos outros latossolos (Embrapa, 1984). O LE2 de Ponta Grossa e o LR de Londrina são solos muito argilosos, com teor de argila variando de 71% a 80%, densidade do solo de 0,8 a 1,09gcm⁻³ e porosidade total entre 64% e 72%. São solos muito profundos, homogêneos nas suas características físicas, principalmente a granulometria e a densidade do solo (Embrapa, 1984). Devido à homogeneidade dos três latossolos nas suas características físicas (Tabela 1), nas profundidades onde foram feitas avaliações de umidade volumétrica e contagem relativa, estes valores (média de três repetições) obtidos nos diferentes métodos de determinação foram considerados como pares de valores para a obtenção das equações de regressão, não se fazendo distinção entre profundidades e densidades.

A utilização de uma equação linear da forma $CR = a \theta + b$ apresentou coeficientes de correlação (r) entre 0,79 e 0,85 (Tabela 2), com significância de

1%, pelo teste F, para todas as equações de calibração das sondas obtidas para as condições de campo. Vários autores têm demonstrado ser esta a melhor equação para relacionar a umidade volumétrica e a contagem relativa (Chanasyk e McKenzie, 1986; Shirazi e Izobe, 1976; Babalola, 1978). Rawls e Asmussen (1973) testaram uma equação quadrática, mas esta não se mostrou melhor do que a equação linear para os valores de umidade volumétrica de onze solos estudados.

Tabela 1. Teor de areia, silte, argila, densidade do solo (D), densidade das partículas (Dp) e porosidade total (P) do latossolo vermelho-escuro de textura média (LE1), textura muito argilosa (LE2) e do latossolo roxo (LR) nas diferentes profundidades

Prof. cm	Arcia ⁽¹⁾ <-----%----->	Silte	Argila	D <---gcm ³ ----->	Dp	P %
LE1						
25	82	1	17	1,61	3,02	47
55	83	1	16	1,51	2,96	49
85	83	1	16	1,48	3,05	51
115	81	2	17	1,48	2,93	49
145	81	1	18	1,48	3,03	51
LE2						
25	14	15	71	0,91	2,73	67
55	12	15	73	0,80	2,84	72
85	13	16	71	0,80	2,75	71
115	13	12	75	0,81	2,90	72
145	17	12	71	0,82	2,69	70
LR						
25	8	12	80	1,09	3,01	64
55	7	15	78	0,98	3,01	67
85	7	17	76	0,98	3,10	68
115	10	15	75	0,99	3,01	67
145	9	16	75	1,01	3,25	69

(1) Areia total

Tabela 2. Coeficientes (a, b) de regressão da equação $CR = a \theta + b$, erro-padrão da estimativa, coeficiente de correlação (r) e teste F dos três latossolos obtidos em condições de campo e de laboratório e a equação fornecida pelo fabricante

Condição	Coeficientes		Erro padrão da estimativa	r	F ⁽¹⁾
	a CS/CP ⁽²⁾	b cm ³ cm ⁻³			
LE1					
Campo	0,04027	0,71440	0,1364	0,85	★★
Laboratório	0,06105	0,03049	0,0706	0,99	★★
Fábrica	0,03110	0,00995	n.d.	n.d.	nd ⁽³⁾
LE2					
Campo	0,02704	0,86053	0,0926	0,79	★★
Laboratório	0,03015	0,62370	0,1065	0,97	★★
Fábrica	0,03110	0,00995	n.d.	n.d.	nd
LR					
Campo	0,01211	0,20770	0,0374	0,79	★★
Laboratório	0,01464	0,06853	0,0279	0,99	★★
Fábrica	0,01566	0,04602	n.d.	n.d.	nd

(1) Significância no nível de 1%; (2) CS/CP = Contagem-solo/contagem-padrão; (3) Não determinado.

Na Figura 1, pode-se observar a representação gráfica dos dados de umidade volumétrica e contagens relativas obtidos a campo com a sonda CPN 503DR para os solos LE1 e LE2; para o solo

LR, foi utilizado o modelo CPN 501DR. A umidade volumétrica medida a campo compreende a faixa do solo praticamente saturado até a umidade volumétrica na capacidade de campo, faixa de umidade importante na determinação de parâmetros hídricos importantes do solo, como a condutividade hidráulica insaturada e saturada e a própria umidade na capacidade de campo (Libardi *et al.*, 1979, Saunders *et al.*, 1978).

A amplitude de variação a campo da umidade volumétrica para os solos LE2 e LR foi muito semelhante (33% a 55%). A diferença nos valores dos coeficientes das equações para a sonda CPN 503DR pode ser devido à blindagem da sonda (Cameron, 1970) ou às diferenças na composição química e mineralógica dos solos (Embrapa, 1984). O modelo CPN 501DR, por ter a blindagem de chumbo, além da parafina silicatada, indica uma menor contagem relativa de nêutrons, para grandes variações da umidade volumétrica. Devido a estas características do equipamento, o modelo CPN 501DR apresentou valor de coeficiente angular (Tabela 2) quatro vezes menor ($0,01464 < 0,06105$) que o modelo CPN; 503DR, o que determina uma menor sensibilidade da sonda CPN 501DR na determinação da umidade volumétrica, visto que grandes variações de umidade do solo determinam pequenas variações na contagem relativa (Figura 1). Comparando aparelhos semelhantes, as diferenças no coeficiente angular (a) das equações dos solos LE1 e LE2, determinadas com o modelo CPN 503DR, podem ser devidos, principalmente à variação da densidade dos solos ($1,48$ a $1,61\text{gcm}^{-3}$ para o LE1 e $0,80$ a $0,91\text{gcm}^{-3}$ para o LE2) e, em menor proporção, à diferença de textura entre os solos (Chanasyk e McKenzie, 1986; Carneiro e De Jong, 1985). Babalola (1978) efetuou a calibração de uma sonda de nêutrons em solos com textura variando de arenosa a argilosa e observou que a textura não influenciou nos coeficientes da equação de regressão, mas que a variação da densidade do solo de $1,4$ a $1,9\text{gcm}^{-3}$ aumentou o valor do coeficiente angular. Os valores do erro-padrão da estimativa (Tabela 2) da contagem relativa das equações ($0,1364$ a $0,0374$) podem ser considerados baixos, quando comparados com outros valores encontrados na literatura (Babalola, 1978; Gornat e Goldberg, 1972). Ao contrário de Shirazi e Izobe (1976), o erro-padrão da estimativa diminuiu com o aumento do conteúdo de argila dos solos. Uma maior variação da densidade do solo nos perfis dos latossolos poderia implicar a necessidade de uma equação de calibração para cada camada do solo. Este aspecto, apesar de não ter sido considerado, pode ser importante em solos que apresentem gradiente textural (podzólicos) ou com camadas naturais de adensamento (Bt), que devem

exigir uma equação de calibração específica para cada faixa de densidade. No caso do presente trabalho, na parcela experimental, embora ocorram pequenas variações na densidade do solo dos perfis dos três latossolos amostrados (Tabela 1), pode-se utilizar uma única equação sem prejuízo na exatidão dos resultados de umidade volumétrica. Em outras condições, isto talvez não possa ser verdade. Em extensas áreas, em solos aparentemente homogêneos, com a instalação de tubos em diferentes locais, podem ocorrer variações muito maiores nos valores de umidade determinados devido à inerente variabilidade espacial das diversas características do solo (Turatti *et al.*, 1990; Reichardt *et al.*, 1997), que influem na retenção e no movimento da água no solo (van Bavel *et al.*, 1961; Nielsen *et al.*, 1973).

A calibração das sondas de nêutrons em condições de laboratório resultou em equações (Tabela 2) que tiveram altos coeficientes de correlação ($r = 0,97$ a $0,99$) e alta significância, pelo teste F (Tabela 2), com os valores de umidade volumétrica determinados (Figura 1), como observado por outros autores (CPN, 1984; Encarnação *et al.*, 1991; Shirazi e Isobe, 1976; van Bavel *et al.*, 1961).

A comparação das equações obtidas a campo, laboratório e a fornecida pelo fabricante, para cada solo (Tabela 2), revelaram coeficientes angulares (a) semelhantes para as três equações, nas determinações realizadas nos latossolos muito argilosos (LE2 e LR). O solo LE1, de textura média, apresentou um coeficiente angular (a), determinado em condições de campo, não muito diferente do coeficiente angular fornecido pelo fabricante e ambos são muito maiores do que o valor obtido em condições de laboratório (Tabela 2). Os baixos valores de contagem relativa medidos em condições de laboratório, com o solo LE1 seco ao ar, estão relacionados com a perda de nêutrons, pela parede do tambor para a atmosfera. Medidas de laboratório (Cameron, 1970) indicam que em meios arenosos secos, o raio da esfera de influência dos nêutrons rápidos emitidos pela fonte é de cerca de 108 a 165cm. Portanto, um tambor com diâmetro de 57cm não constitui um volume infinito para a calibração desse equipamento, nesse solo, em condições de laboratório. Ao contrário, Shirazi e Izobe (1976), trabalhando com solos de diferentes texturas, determinaram raios efetivos da ordem de 15 a 18cm. Há, portanto, a necessidade de estudos mais pormenorizados que avaliem a real esfera de influência dos nêutrons em solos de textura grosseira. Shirazi e Isobe (1976) também encontraram coeficientes angulares, das equações de regressão para os solos arenosos, diferentes dos coeficientes fornecidos pelo fabricante.

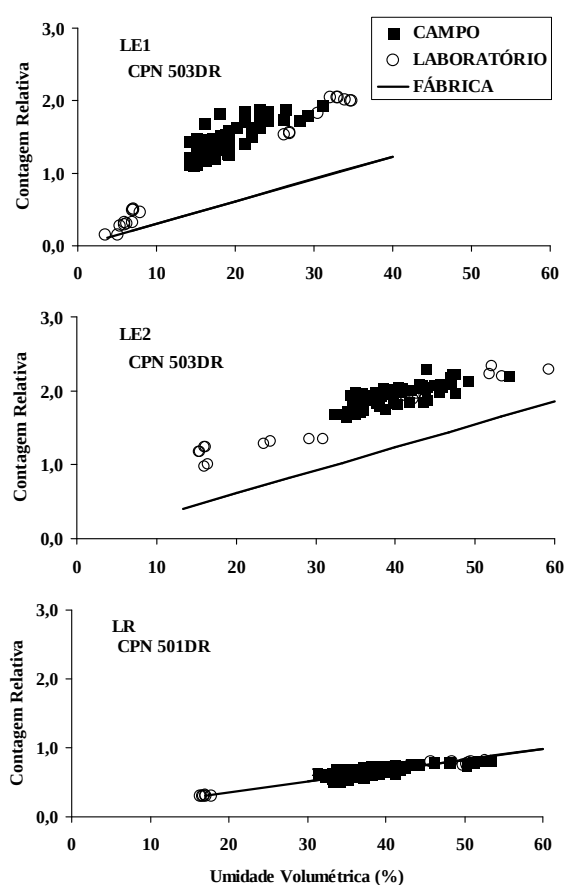


Figura 1. Dados de contagem relativa e umidade volumétrica do latossolo vermelho-escuro de textura média (LE1), textura muito argilosa (LE2) e latossolo roxo (LR), obtidos em condições de campo (■), de laboratório (○) e fornecidos pelo fabricante (retas)

Nos solos LE1 e LE2, a equação de calibração fornecida pelo fabricante subestima os dados de umidade volumétrica obtidos a campo ou no laboratório. O coeficiente (b) do solo LE2 obtido para as condições de campo é pouco maior do que o valor obtido para as condições de laboratório, mas os dois são muito maiores do que o coeficiente (b) fornecido pelo fabricante (Tabela 2); o que deve ser devido à presença, nos latossolos, de água associada a outros componentes, como os minerais de argila e matéria orgânica (CPN, 1984). Os valores semelhantes para o coeficiente angular (a) e as diferenças dos valores para o coeficiente linear (b), para o solo LE2, indicam que a equação fornecida pelo fabricante, embora não estime com exatidão os valores de umidade volumétrica, pode ser útil na determinação da variação deste parâmetro, quando são necessárias medidas sucessivas (Babalola, 1978). Os coeficientes (a , b) das equações de regressão (Tabela 2), obtidas a campo, em laboratório e a fornecida pelo fabricante do solo LR, obtidos com a

sonda CPN 501DR, determinam uma tendência semelhante aos valores de umidade volumétrica determinados (Figura 1); podendo-se, na faixa de umidade considerada, utilizar indistintamente quaisquer uma das equações para medida da umidade volumétrica e sua variação em função do molhamento ou secamento do solo (Babalola, 1978). Este comportamento da sonda CPN 501DR pode ser explicado pela dupla blindagem do equipamento (chumbo mais parafina silicatada com alta densidade), que determina que a sonda possua uma alta contagem-padrão (contagem dos nêutrons moderados pela blindagem) e um conseqüente baixo valor de contagem relativa. Além da maior blindagem, o modelo CPN 501DR possui um outro arranjo geométrico entre a fonte e o detector que determina uma diferente contagem relativa dos nêutrons moderados (van Bavel *et al.*, 1956; Cameron, 1970). Utilizando-se as equações obtidas para as condições de campo (Tabela 2) para o solo LE2 (sonda CPN 503DR) e LR (sonda CPN 501DR), obteve-se, para o modelo CPN 503DR, uma variação de contagem relativa de 0,83 a 2,50, para uma variação de 3,49 a 59,29 na umidade volumétrica. Para o modelo CPN 501DR, obteve-se uma variação de contagem relativa de 0,25 a 0,93, na mesma variação de umidade volumétrica, em solos com características físicas (granulometria e densidade do solo) muito semelhantes. Esta menor amplitude de variação da contagem relativa indica uma menor sensibilidade do modelo CPN 501DR na determinação da umidade volumétrica.

Referências bibliográficas

- Babalola, O. Field calibration and use of the neutron moisture meter on some Nigerian soils. *Soil Sci.*, 126:118-124, 1978.
- Blake, G.R. Particle density. In: Black, C.C. (ed.). *Methods of soil analysis; physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling*. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 371-373.
- Cameron, J.F. *Neutron moisture gauges*, Tech. Rep. Ser. 112. IAEA, Vienna, 1970.
- Campbell Pacific Nuclear. *Operator's Manual 501DR/503DR Depth Probe Moisture. Depth Gauge*: Pacheco, 1984.
- Carneiro, C.; De Jong, E. *In situ* determinations of the slope of the calibration curve of a neutron probe using a volumetric technique. *Soil Sci.*, 139:250-254, 1985.
- Chanasyk, D.S.; McKenzie, R.H. Field calibration of a neutron probe. *Can. J. Soil Sci.*, 66:173-176, 1986.
- Elder, A.N.; Rasmussen, T.C. Neutron probe calibration in unsaturated tuff. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1301-1307, 1994.
- Embrapa-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná. Tomo I. *Boletim Técnico n.º 57*. Londrina, 1984.
- Encarnação, F.; Carneiro, C.; Dall'olio, A.; Vachaud, G. Técnica volumétrica de calibração de uma sonda de nêutrons. *Pesq. Agrop. Bras.*, 26:1107-1112, 1991.
- Evetts, S.R.; Steiner, J.L. 1995. Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:961-968, 1995.
- Gardner, W.; Kirkham, D. Determination of soil moisture by neutron scattering. *Soil Sci.*, 73:791-801, 1952.
- Gornat, B.; Goldberg, D. The relation between moisture measurement with a neutron probe and soil texture. *Soil Sci.*, 114:254-258, 1972.
- Kirda, C.; Reichardt, K. Comparison of neutron moisture gauges with nonnuclear methods to measure field soil water status. *Sci. Agr.*, 49:111-121, 1992.
- Lawless, G.P.; MacGillivray, N.A.; Nixon, P.R. Soil moisture interface effects upon readings of neutron moisture probes. *Soil Sci. Soc. Am.*, 27:502-511, 1963.
- Libardi, P.L.; Reichardt, K.; Nascimento Filho, V.F. Análise de redistribuição de água visando à condutividade hidráulica do solo. *En. Nucl. Agric.*, 2:108-122, 1979.
- Nielsen, D.R.; Biggar, J.W.; Erth, K.T. Spatial variability of field measured soil properties. *Hilgardia*, 42:215-259, 1973.
- Pauletto, E.A. *Dispersão de amostras de terra*. Piracicaba, 1978. Tese (Master's Thesis in Soils and Nutrition of Plants) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- Rawls, W.J.; Asmussen, L.E. Neutron probe field calibration for soils in the Georgia coastal plains. *Soil Sci.*, 116:262-265, 1973.
- Reichardt, K.; Portezan, O.; Bachi, O.O.S.; Oliveira, J.C.M.; Dourado-Neto, D.; Pilotto, J.E.; Calvache, M. Neutron probe calibration correction by temporal stability parameters of soil water content probability distribution. *Sci. Agr.*, 54:17-21, 1997.
- Saunders, L.C.U.; Libardi, P.L.; Reichardt, K. Condutividade hidráulica da Terra Roxa Estruturada em condições de campo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 2:163-167, 1978.
- Shirazi, G.A.; Isobe, M. Calibration of neutron probe in some selected Hawaiian soils. *Soil Sci.*, 122:165-170, 1976.
- Turatti, A.L.; Villagra, M.M.; Ponce, J.E.; Bachi, O.O.S.; Reichardt, K. Soil spatial variability and its implications on the calibration of neutron probes. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 14:59-26, 1990.
- Van Bavel, C.H.M.; Underwood, N.; Swanson, R.W. Soil moisture measurement by neutron moderation. *Soil Sci.*, 82:29-41, 1956.
- Van Bavel, C.H.M.; Nielsen, D.R.; Davidson, J.M. Calibration and characteristics of two neutron moisture probes. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 25:329-334, 1961.

Received on June 16, 1998.

Accepted on July 30, 1998.

