

## **CALIBRAÇÃO DE SONDAS DE CAPACITÂNCIA PARA DETERMINAÇÃO DE UMIDADE EM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO<sup>1</sup>**

**JOÃO JOSÉ DA SILVA JUNIOR<sup>2</sup>; ALBERTO COLOMBO<sup>3</sup>; MYRIANE STELLA SCALCO<sup>4</sup>; BRUNO MONTOANI SILVA<sup>5</sup> E PEDRO TERRA LIMA<sup>5</sup>**

1 Parte da dissertação de mestrado do primeiro autor; 2 Prof. Substituto Departamento de Engenharia Agrícola, Doutorando Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas da UFLA, (Câmpus Universitário, Caixa Postal 3037 CEP 37200-000 Lavras – MG), e-mail: [jjsjunior1@posgrad.ufla.br](mailto:jjsjunior1@posgrad.ufla.br); 3 Prof. PhD. Departamento de Engenharia Agrícola, UFLA, (Câmpus Universitário, Caixa Postal 3037 CEP 37200-000 Lavras – MG), e-mail: [acolombo@deg.ufla.br](mailto:acolombo@deg.ufla.br); 4 Departamento de Agricultura, UFLA, (Câmpus Universitário, Caixa Postal 3037 CEP 37200-000 Lavras – MG), e-mail: [msscalco@dag.ufla.br](mailto:msscalco@dag.ufla.br); 5 Departamento de Ciência do Solo, UFLA, (Câmpus Universitário, Caixa Postal 3037 CEP 37200-000 Lavras – MG), e-mail: [brunoms3@yahoo.com.br](mailto:brunoms3@yahoo.com.br); [pedroterralima@yahoo.com.br](mailto:pedroterralima@yahoo.com.br);

### **1 RESUMO**

Duas sondas de capacitância (PR2/6, Delta-T Devices) foram calibradas para um Latossolo Vermelho Distroférico, no Campus da UFLA, no município de Lavras – MG. Tubos de acesso foram instalados para monitoramento do conteúdo de água, de modo que abriu-se uma trincheira nas proximidades do tubo para retirada de amostras de solo. Efetuaram-se leituras do equipamento, para intervalos de profundidade de 10, 20, 30, 40, 60 e 100 cm, juntamente com a coleta de amostras de solo para a determinação da umidade volumétrica ( $\square v$ ). Para cada uma das profundidades amostradas determinou-se uma equação de calibração. Os maiores ajustes de  $R^2$  obtidos foram 0,877 e 0,793 no sensor de 10 cm, os menores  $R^2$  obtidos foram 0,312 e 0,415 nos sensores de 100 cm. Os sensores das profundidades de 20, 30 e 40 cm nas duas sondas obtiveram valores de  $R^2$  semelhantes nas duas sondas. Os valores dos parâmetros ( $a_1$  e  $a_0$ ) da equação de calibração variaram de 4,475 a 10 para  $a_1$  e -0,017 a 0,789 para  $a_0$  e de 3,818 a 9,160 para  $a_1$  e -2,849 a 1,148 para  $a_0$  nas sondas 1 e 2 respectivamente. Pode-se concluir que a equação proposta pelo fabricante não se aplica a todos os solos, exigindo assim calibração específica para cada solo.

**Palavras-chave:** Conteúdo de água, sonda tipo FDR, solos intemperizados.

**SILVA JUNIOR, J. J. da; COLOMBO, A.; SCALCO, M. S.; BRUNO MONTOANI  
SILVA, B. M. E LIMA, P. T.**

**CALIBRATION OF CAPACITANCE PROBES TO DETERMINE SOIL MOISTURE IN  
A DYSTROFERRIC RED LATOSOL (OXISOL)**

### **2 ABSTRACT**

Two capacitance probes (PR2/6, Delta-T Devices) were calibrated to a Dystroferic Red Latosol (Oxisol) in the Campus of Federal University of Lavras, MG. Access tubes were installed to monitor water content, so that a trench was opened up near the tube to collect soil samples. Equipment readings were performed for depth intervals of 10, 20, 30, 40, 60 and 100 cm, together with soil sample collection in order to determine volumetric water content ( $\theta_v$ ). For each depth sample, a calibration equation was established. The highest adjustments of  $R^2$  were 0.877 and 0.793 in the 10 cm sensor, while the lowest adjustments of  $R^2$  were 0.312 and 0.415 in the 100 cm sensor. Depth sensors of 20, 30 and 40 cm in the 2 probes had similar  $R^2$  values. Values of the parameters ( $a_1$  and  $a_0$ ) of the calibration equation ranged from 4.475 to 10 for  $a_1$  and -0.017 to 0.789 for  $a_0$ ; 3.818 to 9.160 for  $a_1$  and -2.849 to 1.148 for  $a_0$  in the probes 1 and 2, respectively. The equation proposed by the manufacturer cannot be applied to all soils, therefore specific calibration is required for each soil.

**Keywords:** water content, FDR sensor, intemperized soils.

### 3 INTRODUÇÃO

Desta maneira, conhecer a dinâmica distributiva de água no solo torna-se cada vez mais necessária, uma vez que, está intimamente ligada às propriedades do sistema solo-água-plantas (Reichardt & Timm, 2004).

A determinação da umidade do solo é de grande importância econômica, pois proporcionam aumento na eficiência de irrigação, contribuindo na redução de gastos com recurso hídrico e energia, sendo assim seu conhecimento indispensável ao sucesso de uma agricultura sustentável (Souza et al., 2002).

Para quantificar o teor de água no solo há técnicas diretas ou indiretas, sendo o método gravimétrico considerado método direto padrão, que consiste em estimar a umidade pela diferença entre massa úmida e massa seca em estufa a 105 °C EMBRAPA (1997). Há vários métodos indiretos que estimam a quantidade de água a partir de outras propriedades do solo que podem ser associadas à umidade em determinados momentos, dos quais destacam-se os tensiométricos, os radiométricos, os de resistência elétrica, os de reflectometria no domínio do tempo (TDR) e de frequência (sonda de capacitância ou FDR); e os de reflexão ou emissão de radiação (Lima et al., 2012).

Conforme Evett et al. (2006), o princípio de funcionamento da sonda de capacitância utilizada na medição do teor de água é baseada na variação da frequência de ressonância ao passo que a permissividade do solo varie no raio de alcance do sensor. A água é o componente com maior influência sobre a permissividade dielétrica ( $\epsilon_a$ ) e apresenta permissividade relativa maior ( $\epsilon_a = 81$ ) do que a de partículas minerais e orgânicas do solo ( $\epsilon_a = 2-7$ ), e do ar ( $\epsilon_a = 1$ ), o que possibilita a estimativa do valor de umidade do solo ( $\theta$ ) pela medição da  $\epsilon_a$  (Topp et al., 1980).

Os métodos indiretos apresentam vantagens em relação ao método padrão, por proporcionar respostas rápidas, medições não destrutivas, precisão aceitável (Stacheder et al., 2009). As sondas de capacitância estão sendo utilizadas para auxiliar no monitoramento da água do solo e/ou manejo de irrigação e apresentam, como principais vantagens, segurança ao operador em virtude de não estar próximo à fonte radioativa como nas sondas de nêutrons, uma vez que não emitem radiação, facilidade de operação, leituras rápidas e precisas em profundidade

(Gardner et al., 1991). Silva et al. (2012) acrescentam como vantagens a facilidade de monitoramento, pois possibilita diversas medições simultâneas e armazenamento contínuo de dados por longos períodos. O monitoramento pode ser feito por uma única sonda, em campanha de campo, sendo possível a utilização em grandes áreas, o que dilui seu custo econômico de maneira significativa (Lima et al., 2012).

Solos brasileiros são muito intemperizados, destacando os Latossolos que cobrem aproximadamente 50% do território nacional, o que altera significativamente as propriedades dielétricas do solo, e assim há expectativa de redução da acurácia de sensores de capacitância (Silva et al., 2012). Nesse contexto, objetivou-se: (1) avaliar o desempenho da equação padrão do fabricante, por meio de indicadores da acurácia e precisão dos modelos; e (2) realizar a calibração de duas sondas de capacitância (FDR), (PR2/6, Delta-T Devices) in-situ para estimar o teor de água em Latossolo Vermelho distroférico típico.

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

Dois sondas de capacitância (FDR) multisensores (PR2, Delta-T Devices) foram calibradas para um Latossolo Vermelho distroférico típico (LVdf) em área experimental da UFPA, situada no município de Lavras, MG a 21°14' latitude sul e 45°00' de longitude oeste. Utilizou-se duas sondas do mesmo modelo aqui denominadas de Sonda 1 e Sonda 2 pois Segundo Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) qualquer calibração deve referir-se somente ao equipamento sob teste não podendo ser estendida a quaisquer outros mesmo que de mesmo lote ou fabricante. O clima da região, conforme a classificação de Köppen é do tipo Cwa. Foram instalados nove tubos de acesso para a introdução da sonda e monitoramento do conteúdo de água conforme as recomendações do fabricante (Delta-T Devices Ltd., 2004). O tubo de acesso foi instalado no solo de modo que sua parede externa fique em contato direto com o solo, evitando-se, no processo de instalação, que vazios se formassem entre a parede do tubo e o solo.

As leituras foram realizadas nos intervalos de profundidade de 10, 20, 30, 40, 60 e 100 cm, em três repetições. A sonda era girada em 120 graus para a verificação de alguma variação significativa no resultado da leitura, conforme sugerido no manual do fabricante. A sonda de capacitância apresenta duas opções de valores padronizados dos parâmetros de calibração, específicos para cada solo, sendo o  $a_0$  é o coeficiente linear e  $a_1$  o coeficiente angular, definidos pelo fabricante, uma para solos minerais e outra para solos orgânicos em função das características do solo estudado. A sonda foi configurada para utilizar os parâmetros originais de suas equações internas ( $a_0$  e  $a_1$ ) definidos para solos minerais. Abriu-se uma trincheira nas proximidades do tubo para a retirada de amostras de solo com o auxílio de um trado para determinação do conteúdo de água através do método gravimétrico, e, nos mesmos intervalos de profundidade, amostras indeformadas para determinação da densidade do solo.

O fabricante sugere a utilização de dois níveis de umidade, e com intuito de melhorar a precisão experimental, utilizou-se três níveis de forma a abranger toda a amplitude nos valores do conteúdo de água no solo, denominados saturado, úmido e seco. As leituras de saída do sensor ( $V$ ) no campo foram obtidas em volts, e convertidas na raiz quadrada da permissividade dielétrica ( $\sqrt{\epsilon}$ ) usando a equação de calibração recomendada pelo fabricante (equação 1). Em seguida fez-se um gráfico das leituras de  $\sqrt{\epsilon}$  versus a umidade determinada pelo método padrão de estufa e

ajustou-se uma linha de tendência linear para os dados na forma  $\mathbf{a} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{b}$ , na qual os coeficientes da curva de calibração foram  $a_1 = a$  e  $a_0 = b$ . Para converter as leituras da sonda de  $\sqrt{\epsilon}$  para umidade volumétrica utilizou-se a equação 2:

$$\sqrt{\epsilon} = 1.125 - 5.53V + 67.17V^2 - 234.42V^3 + 413.56V^4 - 356.68V^5 + 121.53V^6 \quad (1)$$

$$\theta = \frac{\sqrt{\epsilon} - \mathbf{a}_0}{\mathbf{a}_1} \quad (2)$$

Para cada uma das profundidades amostradas determinou-se uma equação de calibração e posteriormente, ajustou-se também uma equação de calibração para a toda a série de dados para cada uma das sondas.

Os indicativos estatísticos MEA (média dos erros), RMSE (raiz quadrada da média dos quadrados dos erros), foram utilizados na avaliação do modelo (Gomes et al., 2002), assim como o cálculo da eficiência do modelo de calibração ( $E_f$ ) segundo Nash & Suttcliffe (1970), o índice  $d$  de Wilmott, o índice de Aceitação (IoA), além do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que foi utilizado para verificar o quanto a variação dos resultados obtidos com a sonda pode explicar a variabilidade dos dados medidos com o método gravimétrico. Os indicativos estatísticos MEA, RMSE e a Eficiência do modelo ( $E_f$ ),  $d$  e IoA, foram obtidos pelas equações:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2} \quad (3)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (4)$$

Em que:

$n$  = número de dados;

$O_i$  = valor observado;

$\bar{O}$  = média do valor observado; e

$E_i$  = valor estimado.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os coeficientes da equação de calibração  $a_1$  e  $a_0$  obtidos no campo para as diferentes profundidades para a sonda 1 podem ser observados na tabela 1. Os maiores valores de  $R^2$  foram obtidos para as profundidades de 10 e 20 cm com valores de 0,793 e 0,736 respectivamente. O menor valor foi obtido para a profundidade de 100 cm, com valor de 0,4153 e para as profundidades de 30, 40 e 60 cm foram obtidos valores de  $R^2$  muito semelhantes.

**Tabela 1.** Coeficientes  $a_1$  e  $a_0$  da curva de calibração para diferentes profundidades em Latossolo vermelho distroférico para a sonda 1 obtidos em campo.

Profundidade (cm)	$a_1$	$a_0$	$R^2$
10	10	-0,0179	0,7927
20	20,677	-3,855	0,7355
30	13,701	-1,6941	0,6705
40	8,2073	0,2283	0,6703
60	4,9217	0,7889	0,6361
100	4,4753	-0,1621	0,4153

Esses valores de  $R^2$  estão próximos do obtido por Kaleita et al. (2005) que realizou uma calibração de campo para a sonda de capacitância Theta Probe ML2X da Delta T devices e obteve um  $R^2$  de 0,77, porém para a camada de 0-6 cm. Salienta-se que a sonda de multisensor de capacitância PR2/6, utilizada no presente trabalho, tem o mesmo princípio de funcionamento da sonda de capacitância ML2X utilizada por Kaleita et al. (2005), na obtenção da constante dielétrica do meio, permitindo assim uma comparação direta (Delta-T Devices Ltd., 2004).

Na Tabela 2 são mostrados os coeficientes da equação de calibração  $a_1$  e  $a_0$  obtidos no campo para as diferentes profundidades para a sonda 2.

**Tabela 2.** Coeficientes  $a_1$  e  $a_0$  da curva de calibração para diferentes profundidades em Latossolo vermelho distroférico para a sonda 2 obtidos em campo.

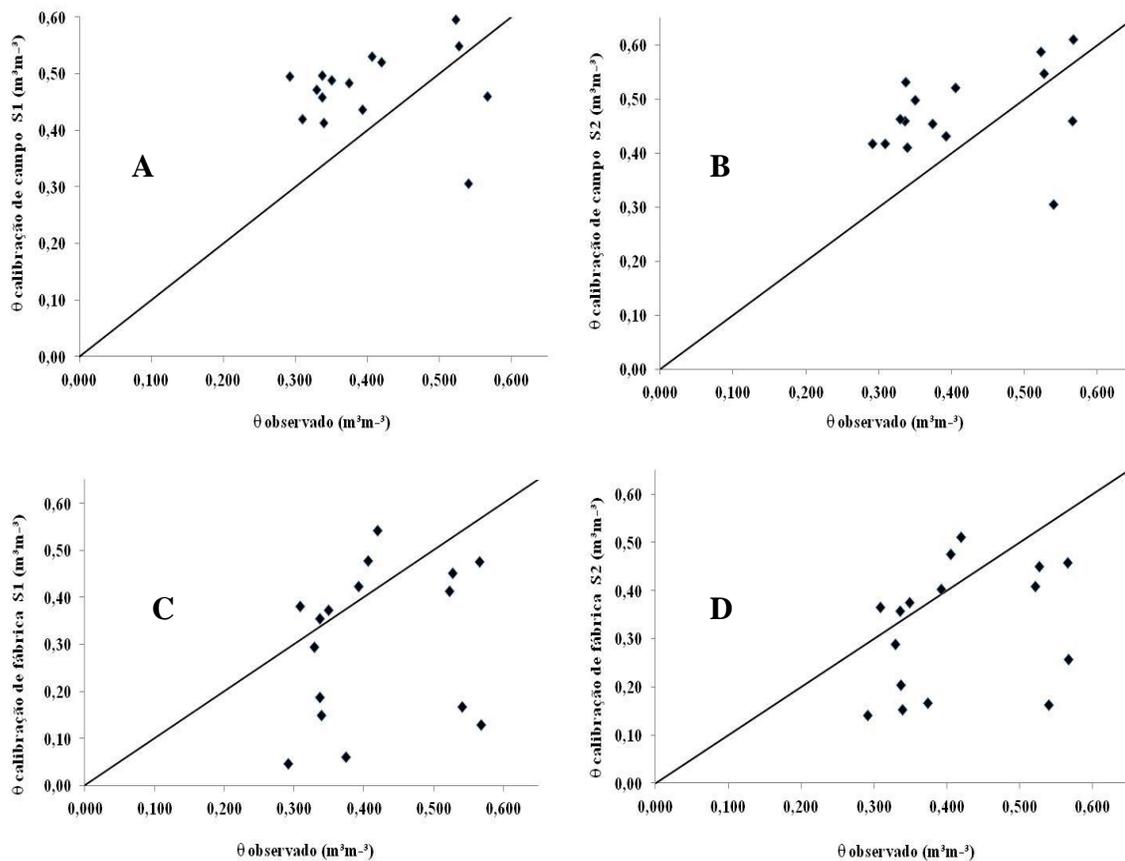
Profundidade (cm)	$a_1$	$a_0$	$R^2$
10	9,1601	0,1985	0,8772
20	17,917	-2,8498	0,6906
30	16,236	-2,8818	0,6418
40	7,9108	0,3785	0,6563
60	3,8182	1,3108	0,4449
100	4,3683	1,1483	0,3117

O maior valor de  $R^2$  ( $R^2=0,8772$ ) foi obtido para a profundidade de 10 cm e os menores valores de  $R^2$  foram obtidos para as profundidades de 60 e 100 cm, com valores de 0,4449 e 0,3117 respectivamente. Para as profundidades de 20, 30 e 40 cm foram obtidas equações de calibração com valores de  $R^2$  semelhantes. Os menores valores de  $R^2$  para as profundidades de 60 a 100 cm para ambas as sondas, sugere que esse efeito é devido a natureza do solo nessa camada. Essa camada faz parte do horizonte B muito intemperizado, com maiores teores de óxidos de ferro pedogênicos, uma vez que nas camadas superiores, os teores notadamente mais elevados de

matéria orgânica reduzem o efeito dos óxidos de ferro. Destaca-se ainda que na profundidade de 100 cm, pode haver acúmulo de água por condensação de umidade no fundo do tubo de acesso. Esse efeito é relatado pelo fabricante (Delta-T devices, 2004). Salienta-se que o decréscimo dos valores de  $R^2$  com o aumento da profundidade (tabelas 1 e 2) foi verificado para as duas sondas. Qi & Helmers (2010) também observaram decréscimos nos valores de  $R^2$  com o aumento da profundidade.

Polyakov et al. (2005) calibraram sondas de capacitância em condições de campo para uma área cultivada e pastagem com solos tropicais intemperizados argilosos e areno-siltosos em Oahu, Hawaii e obtiveram valores de  $R^2$  de 0,74 e 0,73 para a área cultivada e de pastagem, respectivamente, valores próximos dos obtidos no presente trabalho também em condições de campo. Mazahrih et al. (2008) realizaram uma calibração de campo para uma sonda de nêutrons e três sensores de capacitância entre elas uma sonda de capacitância PR2/6, para um solo argilo-siltoso no Vale de São Joaquim na Califórnia. Esses autores obtiveram equações de calibração com coeficientes de determinação  $R^2$  variando de 0,60 a 0,982 para a sonda de capacitância PR2/6. Baixos valores de  $R^2$  para calibrações de campo foram relatados também por Qi e Helmers (2010), que calibraram uma sonda de capacitância PR2/6, em campo, sob diferentes rotações de cultivo em Iowa - EUA para um e dois anos de dados de umidade e para três camadas de solo 0-15 cm, 15-30 cm e 30-60 cm. Neste caso, foram obtidos valores médios de  $R^2$  de 0,651, 0,645 e 0,437 para um ano e 0,603, 0,582 e 0,274 para dois anos nas camadas de 0-15 cm, 15-30 cm e 30-60 cm, respectivamente.

Na Figura 1 observa-se a comparação entre os valores de umidades obtidos com as sondas utilizando a equação de calibração obtida no campo e a equação de calibração padrão do fabricante versus os valores de umidade obtidos com o método gravimétrico. O teor de água medido pela sonda de capacitância, calibrada em campo, foi superestimado em comparação ao método padrão da estufa, em praticamente toda a faixa de umidade avaliada, exceto para valores de umidade acima de  $0,5 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , na qual ocorreu uma subestimativa do teor de água medido. Tal fato, como indica a dispersão dos dados ajustados entre os valores observados e os valores medidos na calibração mineral, ocorreu sempre abaixo da reta 1:1 nas duas sondas utilizadas.

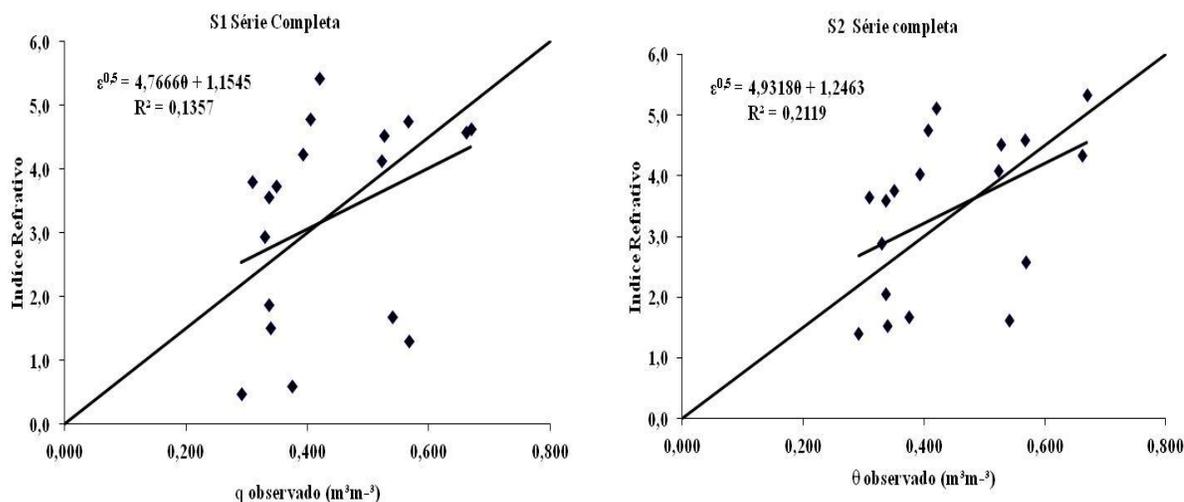


**Figura 1.** Comparação entre os valores de umidade do solo obtidos com a equação de calibração com relação ao método gravimétrico para a sonda 1 (A) e sonda 2 (B), e a calibração de fábrica com relação ao método gravimétrico para sonda 1 (C) e sonda 2 (D).

Observa-se que para a calibração de fábrica tanto para a sonda 1 (figura 1C) quanto para a sonda 2 (figura 1D) há uma subestimativa dos valores de umidade volumétrica em relação ao método gravimétrico, indicando que a calibração de fábrica não é adequada à determinação de umidade no solo estudado o que resulta na necessidade de calibração específica da sonda para cada tipo de solo. Tal fato pode ser atribuído aos altos teores de óxidos de ferro e ao elevado grau de intemperização do Latossolo Vermelho distroférrico que afetam a constante dielétrica e, consequentemente, a umidade estimada (Villwock et al., 2004; Santos et al., 2010) em virtude da presença elevada de cargas positivas no complexo de troca. O mesmo comportamento foi observado por Lima et al. (2012) que trabalhando com sondas multisensores de capacitância, PR2/6 da Delta-T Devices Ltd, para a medição, em campo, da umidade de solos típicos do Cerrado, constataram que a calibração de fábrica subestimou os valores de umidade medidos em relação ao método gravimétrico. Silva & Gervásio (1999), também obtiveram valores subestimados do teor de água medido por sonda TDR em um Latossolo muito argiloso, ao utilizar a calibração padrão do fabricante.

Observa-se que para a calibração obtida neste estudo (figura 1 A e B) tanto para a sonda 1 quanto para a sonda 2 há uma superestimativa dos valores de umidade volumétrica em relação ao

método gravimétrico. Essa tendência também foi observada por Mwale et al. (2005), que calibrou e comparou o desempenho da sonda de capacitância PR1/6 da Delta-T Devices Ltd, em casa de vegetação com uma sonda de nêutrons. Os autores observaram uma tendência de superestimativa dos valores de umidade determinados pela sonda assim como um desvio significativo das linhas de regressão dos dados obtidos pela sonda em relação a linha 1:1.



**Figura 2.** Calibração da sonda 1 e sonda 2 Delta-T PR2/6 com base nos dados médios de umidade de todas as profundidades do solo medidos com o método gravimétrico.

Como se pode observar na Figura 2, utilizando os dados de todas as profundidades para obtenção da equação de calibração única para o perfil do solo, os valores dos coeficientes da equação de calibração obtidos foram de 4,767 e 4,932 para  $a_1$  e 1,545 e 1,246 para  $a_0$  para as sondas S1 e S2 respectivamente. Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram de 0,136 e 0,212 para as sondas 1 e 2, respectivamente. Baixos valores de  $R^2$  (0,315) foram obtidos também por Lima et al. (2012) na calibração de leituras de sondas multisensores de capacitância, PR2/6 da Delta-T Devices Ltd, em campo, sob solos típicos do Cerrado.

Neste estudo observou-se que há uma considerável redução nos valores de  $R^2$  obtidos quando se utiliza toda a série de dados (figura 2) em comparação com a calibração por camadas (tabela 1 e 2) na qual os menores  $R^2$  obtidos foram de 0,415 e 0,312 para sonda 1 e 2, respectivamente. Esses valores são superiores aos valores obtidos para a série única considerando todas as camadas. Esta tendência também foi observada por Silva et al. (2012), que calibrando uma sonda multisensores de capacitância, PR2/6 da Delta-T Devices Ltd em laboratório obtiveram menores índices de acurácia para os modelos de calibração que utilizavam toda a série de dados em comparação com aos modelos de calibração por camada.

Vários estudos mostraram que as calibrações de fábrica para sensores de capacitância não são acurados para todos os tipos de solo (Baumhardt et al. 2000; Evett et al. 2002a, 2002b, 2006; Evett & Steiner, 1995; Paltineanu & Starr, 1997; Silva et al., 2012). Em um estudo apresentado pela Food and Agriculture Organization & International Atomic Energy Agency (2003), o qual comparou o desempenho de sensores de capacitância, sonda de nêutrons e TDR, a sonda Delta-T PR1/6 foi a que apresentou os piores resultados em termos de precisão e acurácia. Evett et al.

(2003), comparando diversos sensores de capacitância utilizados com tubos de acesso (Sentek EnviroSCAN, Diviner 2000, Delta-T PR1/6 e a Trime T3), uma sonda de nêutron e um TDR, sob condições controladas em uma coluna de solo, concluíram que a sonda Delta-T PR1/6 foi o sensor de menor acurácia entre os testados.

Segundo Evett et al. (2006) a baixa acurácia dos modelos sob condições de campo pode ser atribuída ao pequeno volume de solo abrangido na medição das sondas, às variações de densidade do solo, ao próprio teor de água junto ao tubo de acesso e a efeitos de deformações ocorridas durante a instalação do tubo de acesso.

É motivado o uso de calibrações de campo específicas para as condições locais de cada pesquisa ou extensão da sonda de capacitância PR2/6, em virtude destas apresentarem desempenho bastante superior à calibração de fábrica, bem como é recomendável o uso dos coeficientes da equação de calibração  $a_1$  e  $a_0$  obtidos para cada camada, como no caso do presente estudo.

Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros: raiz quadrada da média dos quadrados dos erros (RMSE) e índice  $d$  de Wilmott utilizados para comparação das equações de calibração específicas obtidas no campo para todas as profundidades conjuntamente, e, da equação do fabricante para as duas sondas em relação aos valores de umidades obtidos pelo método padrão de estufa ou gravimétrico.

**Tabela 3.** Raiz quadrada da média dos quadrados dos erros (RMSE) e índice  $d$  de concordância de Wilmott para as equações de calibração específicas obtidas no campo e para a equação de calibração do fabricante das sondas S1 e S2 em diferentes níveis de umidade.

Indicativos estatísticos	S1 calibrada	S1 não calibrada	S2 calibrada	S2 não calibrada
$d$ de Wilmott	0,999	0,958	0,999	0,967
RMSE	0,086	0,616	0,097	0,561

Para ambas as sondas, as equações de calibração de campo apresentaram um índice  $d$  de concordância de Wilmott maiores que os apresentados pela equação de calibração do fabricante (Tabela 3). Os valores para o índice  $d$  obtidos neste trabalho foram maiores que o valor de 0,69 obtido por Lima et al. (2012) para calibração de campo da sonda multisensor de capacitância, PR2/6 da Delta-T Devices Ltd, em solos típicos do Cerrado.

Para ambas as sondas as equações de calibração obtidas no campo obtiveram valores de RMSE menor que a equação de calibração do fabricante (Tabela 3). Qi e Helmers (2010) observaram valores de RMSE para calibração específica no campo variando de 0,037 a 0,069  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . Irmak & Irmak, (2005) calibrando a sonda PR2/6 para quatro solos de diferentes texturas obtiveram valores de RMSE variando entre 0,040 e 0,050  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ .

Os valores de RMSE obtidos pela calibração padrão do fabricante variaram de 0,561 a 0,616  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  esses valores foram maiores que os obtidos por Qi e Helmers (2010), que encontraram valores de RMSE variando entre 0,070 a 0,132  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  para as equações de calibração do fabricante. Isso sugere que em Latossolos com altos teores de ferro, como no presente estudo, o erro gerado pela utilização da equação do fabricante é marcante, principalmente observado em condições de estudo de acurácia em campo. Para a sonda 1 por

exemplo, em um solo seco com  $0,050 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , a sonda sem calibração pode apresentar uma leitura de  $0,666 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Em condições de laboratório esse erro é menor, como observado por Silva et al. (2012), que obtiveram valores de RMSE para a calibração padrão do fabricante variando de 0,094 ate 0,117, calibrando uma sonda multisensores de capacitância, PR2/6 da Delta-T Devices Ltd.

Alguns pesquisadores dentre eles Morgan et al. (1999), Fares et al. (2004) e Franco (2009) relataram grandes diferenças nos valores estimados de umidade por calibrações locais quando comparados com valores estimados pela calibração fornecida pelo fabricante, o que foram diretamente associadas às diferenças quanto ao tipo de solo, granulometria e estrutura do solo; desta forma, os resultados obtidos neste trabalho sugerem que para cada condição em estudo as calibrações locais devem ser obtidas.

## 6 CONCLUSÕES

O uso da técnica da FDR, por meio da sonda de capacitância Profile Probe PR2/6 , mostra-se apropriada para a obtenção do conteúdo de água no solo em Latossolo vermelho distroférrico desde que seja realizada uma calibração específica para o mesmo, uma vez que solos intemperizados com altos teores de óxido de ferro implicam em redução da acurácia, havendo a necessidade de correção dos parâmetros de calibração do fabricante.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/IEC 17025**: requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2005.

BAUMHARDT, R. L.; LASCANO, R. J.; EVETT, S. R. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 6, p. 1940-1946, 2000.

DELTA-T DEVICES LTD. **Profile probe type PR2 user manual 2.0**. Cambridge, 2004. 42 p.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EVETT, S. R.; STEINER, J. L. Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n. 4, p. 961-968, 1995.

EVETT, S. R.; TOLK, J. A.; HOWELL, T. A. Soil profile water content determination: sensor accuracy, axial response, calibration, temperature dependence, and precision. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 5, n.3, p. 894-907, 2006.

EVETT, S.R. et al. Accuracy and Precision of Soil Water Measurements by Neutron, Capacitance, and TDR Methods. In: **WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE**, 17., 2002, Bangkok. **Anais...** Bangkok: editado em CD-Rom, 2002a.

EVETT, S. R. et al. Neutron Scattering, Capacitance, and TDR Soil Water Content Measurements Compared on Four Continents. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 17., 2002, Bangkok. **Anais...** Bangkok: editado em CD-Rom, 2002b.

Evett, S.R., J.A. Tolk, and T.A. Howell. A depth control stand for improved accuracy with the neutron probe. **Valdoso Zone Journal**, Madison, v. 2, n.4 , p. 642–649, 2003.

FAO/IAEA-FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION; INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Comparison of soilmoisture sensors between neutron probe, time domain reflectometry and capacitance probe**. Viena, 2003. 14 p. (Report IAEA-311-CT00028)

FARES, A. et al. Dual field calibration of capacitance and neutron soil water sensors in a shrinking-swelling clay soil. **Valdoso Zone Journal**, Madison, v. 4, n.3 , p. 1390-1399, 2004.

FRANCO, E. M. **Monitoramento da dinâmica da água e solutos em perfil de solo sob sistema de fertirrigação por gotejo, utilizando sonda de capacitância e extratores de solução**. 2009. **Número de folhas**. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

GARDNER, C. M. et al. Soil water content. In: SMITH, R. A.; MULLINGS, C. E. (Ed.). **Soil analysis: physical methods**. New York: Marcel Dekker, 1991, cap.1, p. 1-73.

GOMES, E. N. et al. Modelos de estimativa da par global e difusa em função da radiação de ondas curtas e da transmissividade atmosférica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz de Iguaçu. **Anais...** Foz de Iguaçu: editado em CD-Rom, 2002.

IRMAK, S.; IRMAK, A. Performance of frequency-domain reflectometer, capacitance, and pseudo-transit time-based soil water content probes in four coarse-textured soils. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 21, n.6, p. 999-1008, 2005.

LIMA, J. E. F. W. et al. Avaliação do desempenho de sonda de capacitância no monitoramento da umidade de latossolos do cerrado em condições de campo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 23-32, jan. 2012.

MWALE, S. S.; AZAM-ALI, S. N.; SPARKERS, D. L. Can the PR1 capacitance probe replace the neutron probe for routine soil water measurement. **Soil Use and Management**, Londres, v. 21, n.3, p. 340-347, 2005.

MAZAHRIH, N. et al. Field calibration accuracy and utility of four down-hole water content sensors. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 7, n.3, p. 992-1000, 2008.

MORGAN, K. T.; PARSONS, L. R.; WHEATON, T. A. Field calibration of a capacitance water content probe in fine sand soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n.4, p. 987, 1999.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models Part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, (Amsterdam, v. 10, n.3 , p. 282-290, 1970.

KALEITA, A. L.; HEITMAN, J. L.; LOGSDON, S. D. Field calibration of the theta probe For des moines lobe soils. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 21, n. 5, p. 865-870, 2005.

PALTINEANU, I. C.; STARR, J. L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n.6, p. 1576-1585, 1997.

POLYAKOV, V.; FARES, A.; RYDER, M. H. Calibration of a capacitance system for measuring water content of tropical soil. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 4, n.4, p. 1004-1010, 2005.

QI, Z.; HELMERS, M. J. The conversion of permittivity as measured by a PR2 capacitance probe into soil moisture values for Des Moines lobe soils in Iowa. **Soil Use and Management**, Londres, v. 26, n.1, p. 82-92, 2010.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceito, processo e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478 p.

SANTOS, M. R.; ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A. Influência do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas de TDR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n.2, p. 299-307, 2010.

SILVA, E. L.; GERVÁSIO, E. S. Uso do instrumento TDR para determinação do teor de água em diferentes camadas de um Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina grande, v. 3, n.3, p. 417-420, 1999.

SILVA, B. M. et al. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 47, n. 2, p.277-286, fev. 2012.

STACHEDER, M.; KOENIGER, F.; SCHUHMANN, R. New dielectric sensors and sensing techniques for soil and snow moisture measurements. **Sensors**, Porto, v. 9, n.4, p. 2951-2967, 2009.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. **Water Research Resource**, Washington, v. 16, n.3, p. 574-582,1980.

VILLWOCK, R.; TAVARES, M. H. F.; VILAS BOAS, M. A. Calibração de um equipamento TDR em condições de campo. **Irriga**, Botucatu, v. 9, n.1, p. 82-88, 2004.