

Avaliação do Desempenho de Sonda de Capacitância no Monitoramento da Umidade de Latossolos do Cerrado em Condições de Campo

Jorge Enoch Furquim Werneck Lima, Euzébio Medrado da Silva

Embrapa Cerrados

jorge@cpac.embrapa.br, euzebio@cpac.embrapa.br

Sergio Koide, Ronaldo Medeiros dos Santos

Departamento de Eng. Civil e Ambiental da Universidade de Brasília – ENC/UnB

skoide@unb.br; ronaldo.medeiros@ifnmg.edu.br

Recebido: 27/07/09 - revisado: 03/10/10 - aceito: 21/11/11

RESUMO

A medição da umidade do solo é essencial em estudos de balanço hídrico. Existem diferentes métodos, diretos e indiretos, para a determinação do conteúdo de água no solo, cada qual com suas vantagens e desvantagens. Os sensores de capacitância possibilitam a construção de sondas multisensores com grande portabilidade, que permitem, com um único equipamento, o levantamento e o armazenamento de dados de umidade do solo em diferentes locais, profundidades e intervalos de tempo, podendo se constituir em excelente ferramenta para o monitoramento e o estudo dos processos que regem o movimento da água no solo. Contudo, o uso dessa alternativa depende de validação da qualidade dos dados gerados. Assim, o objetivo deste trabalho foi verificar a aplicabilidade de sondas multisensores de capacitância, a PR2/6 da Delta-T Devices Ltd, para a medição, em campo, da umidade de solos típicos do Cerrado em diferentes pontos de monitoramento. Em oito locais, seis profundidades e em diferentes épocas do ano, foram levantados 162 dados de umidade do solo com uma sonda PR2/6 da Delta-T e, simultaneamente, foram efetuadas medições por meio do método gravimétrico para comparar os resultados nos mesmos pontos. Os resultados indicam que a sonda multisensor de capacitância Delta-T PR2/6, utilizando uma única relação entre a voltagem e o conteúdo de água no solo, não é capaz de substituir adequadamente o método gravimétrico no monitoramento do teor de umidade de Latossolos do Cerrado em condições de campo.

Palavras-chave: monitoramento, hidrometria, sonda Delta-T.

INTRODUÇÃO

O monitoramento da umidade do solo é uma prática importante em estudos de balanço hídrico, o qual tem aplicação em diversas áreas do conhecimento. No caso dos sistemas agrícolas, em que o crescimento das plantas e a produtividade das culturas têm maior relação com a umidade no solo do que com qualquer outro elemento meteorológico isolado, inclusive a chuva (Baier e Robertson, 1968), esse monitoramento é fundamental. O conhecimento do regime de variação da umidade no solo fornece informações imprescindíveis para a análise e a solução de problemas como os seguintes: manejo de irrigação; escolha da época de plantio; determinação do consumo de água pelas plantas; estudo dos processos de transferência de água, calor e nutrientes no sistema solo-planta-atmosfera; e planejamento dos sistemas de drenagem.

Em estudos hidrológicos, o solo é o principal meio de transporte e de armazenamento da água. Nas camadas de solo mais próximas da superfície, os processos de movimentação da água, por meio da infiltração, evaporação, absorção pelas plantas, redistribuição e drenagem, ocorrem de forma mais dinâmica, o que demanda maior detalhamento espaço-temporal desse monitoramento.

Existem diferentes métodos, diretos e indiretos, para a determinação do conteúdo de água no solo e que podem ser empregados na realização dessa atividade de monitoramento. O método considerado como padrão é o gravimétrico (Rawls et al., 1992), que consiste em medir diretamente o peso da água presente em determinada amostra de solo em relação ao seu peso seco em estufa à 105 °C. Os métodos indiretos estimam a umidade do solo a partir da medição de outra propriedade que pode ser relacionada ao seu conteúdo de água em um dado momento. Entre os métodos indiretos, destacam-se:

os tensiométricos (tensiômetros); os radiométricos (sonda de nêutron); os de resistência elétrica (bloco de gesso); os de reflectometria no domínio do tempo (TDR); os de capacitância ou reflectometria no domínio da frequência - FDR (Sonda de Capacitância); e os de reflexão ou emissão de radiação (sensoriamento remoto).

Os equipamentos do tipo TDR e FDR podem ser agrupados na mesma categoria porque ambos baseiam seu princípio de funcionamento nas características eletromagnéticas do solo (Evelt et al., 2006). Segundo diversos autores (Evelt e Steiner, 1995; Baumhardt et al., 2000; Kelleners et al., 2004a, 2004b), apesar da vantagem dos métodos eletromagnéticos poderem ser incorporados em equipamentos eletrônicos com portabilidade adequada à aquisição automática de dados e o seu armazenamento em campo, seus resultados podem apresentar problemas de precisão e acurácia. Em geral, os sensores de capacitância (FDR) têm maior flexibilidade do que os equipamentos do tipo TDR no que se refere à forma e frequência de operação dos equipamentos, admitindo a construção de sondas multi-sensores. Assim, é possível, com um único equipamento, em campo, realizar o levantamento e o armazenamento de dados de umidade do solo em diferentes profundidades e intervalos de tempo, fazendo com que esse tipo de equipamento seja visto como uma excelente ferramenta para o monitoramento dos processos que regem o movimento da água no solo. No entanto, como qualquer tipo de equipamento destinado à medição indireta de propriedades do solo, sua aplicação carece de verificação da qualidade dos dados gerados e de comprovação do grau de fidelidade das medidas com a realidade que se pretende caracterizar.

Este trabalho tem por objetivo verificar a aplicabilidade de sonda multisensor de capacitância, a PR2/6 da Delta-T Devices Ltd., para a medição, em campo, da umidade em latossolos do Cerrado em diferentes pontos de monitoramento, utilizando uma única equação.

MATERIAL E MÉTODOS

Utilizou-se uma sonda multisensor de capacitância do tipo PR2/6, da Delta-T Devices Ltd., a qual, teve seu funcionamento previamente verificado por meio da comparação de seus resultados com o de outras duas sondas do mesmo tipo e fabricante. Posteriormente, foi realizado o trabalho de verificação do desempenho desse tipo de sonda no monito-

ramento da umidade do solo em condições de campo, em escala de bacia hidrográfica.

Descrição do equipamento

Os dispositivos eletrônicos das sondas de perfil PR2/6 estão montados em um tubo de polícarbonato, com aproximadamente 2,5 cm de diâmetro externo e pouco mais de um metro de comprimento, devidamente configurado para medir a umidade do solo nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 60 e 100 cm, exatamente onde se encontram instalados os sensores eletrônicos, visualizados na forma de pares de anéis de aço inoxidável (Delta-T Devices Ltd, 2004).

Antes da leitura, a sonda é inserida em um tubo de acesso próprio do equipamento, construído com uma fina parede de fibra de vidro, que pouco afeta a transferência do campo eletromagnético gerado pelos sensores e o solo ao seu redor. Esse tubo de acesso é inserido no solo de modo que sua parede externa fique em contato direto com o solo, procurando-se evitar, no processo de inserção, que vazios sejam formados entre a parede desse tubo e o solo. A existência desses vazios ao redor dos anéis onde se localizam os sensores diminui a acurácia de medidas da sonda.

A leitura dos dados das sondas é feita com equipamento portátil próprio, com visor eletrônico, denominado HH2, que mostra e grava os resultados das medições em volts (V) e em teor de umidade em base volumétrica ($m^3.m^{-3}$).

Princípio de funcionamento do equipamento

Os sensores de capacitância se utilizam de um oscilador de frequência para gerar um campo de corrente alternada (AC) o qual serve como meio de detecção das propriedades dielétricas do solo naquele momento. A magnitude da constante dielétrica do solo, medida indiretamente nesse processo, pode ser relacionada com o teor de água do meio poroso. Esses sensores são pares de eletrodos, constituídos de barras ou anéis circulares de metal, que funcionam como se fossem capacitores, no qual o solo atua como o material dielétrico. Esse capacitor trabalha em conjunto com o oscilador, gerando um circuito finamente ajustado, que tem sua frequência de operação alterada em função do teor de umidade do solo (Palúneanu e Starr, 1997). Todo esse processo baseia-se no fato de que a constante dielétrica do solo varia sensivelmente com seu conteúdo de água. Nesse aspecto, destaca-se que, em seus extremos, na água, a constante dielétrica é cerca de 80 e

no ar, de aproximadamente 1. Na condição de solo seco, o valor da constante dielétrica está em torno de 4 (Dean et al., 1987).

No caso das sondas Delta-T PR2/6, quando acionadas, um sinal de 100 MHz de frequência, similar a uma onda de rádio FM, é gerado e aplicado em cada par de anéis existentes ao longo da extensão da haste da sonda, nas profundidades de medição do aparelho. Desse modo, o campo eletromagnético resultante, que se estende ao redor dos sensores por um raio de cerca de 100 mm dentro do solo, serve para estimar indiretamente o conteúdo de água próximo aos sensores, por meio do correspondente valor da constante dielétrica ou permissividade do meio poroso, determinado com base na detecção da amplitude da onda de retorno. Portanto, a partir do sinal de retorno da frequência emitida pela sonda, que sofre alterações, medidas e relacionadas à constante dielétrica ou permissividade do solo (ϵ), determina-se o índice de refração do solo úmido, que é equivalente a $\sqrt{\epsilon}$, que varia em função da umidade do solo.

A relação entre $\sqrt{\epsilon}$ e o conteúdo de água no solo (θ) é dada pela Equação 1 (Delta-T Devices Ltd., 2004).

$$\sqrt{\epsilon} = a_0 + a_1\theta \quad (1)$$

em que:

a_0 e a_1 : parâmetros do modelo.

Os equipamentos apresentam duas opções de valores padronizados de a_0 e a_1 : uma para solos minerais e outra para solos orgânicos. Segundo o fabricante (Delta-T Devices Ltd., 2004), para a maioria dos solos agrícolas, utilizando-se os valores genéricos pré-definidos por eles, o erro absoluto dos resultados de umidade seria de aproximadamente 0,06 m³.m⁻³. Com o uso de parâmetros calibrados para solos específicos, uma equação por tipo de solo, o fabricante estima que esse erro seja apenas um pouco atenuado, passando para 0,05 m³.m⁻³. No entanto, para os casos de solos muito argilosos ou com grande conteúdo de matéria orgânica, bem como aqueles com variação na salinidade, o fabricante recomenda a realização de estudos para a calibração específica dos parâmetros a_0 e a_1 . O mesmo vale para estudos que requerem maior precisão.

De acordo com Delta-T Devices Ltd. (2004) e van Bavel e Nichols (2002), a relação entre $\sqrt{\epsilon}$ e a

voltagem (V) registrada pelos equipamentos pode ser ajustada a um modelo polinomial, conforme apresentado na Equação 2.

$$\sqrt{\epsilon} = a + bV + cV^2 + \dots + zV^n \quad (2)$$

em que:

a, b, c, d e z: parâmetros do modelo.

Combinando-se as Equações 1 e 2, obtém-se a relação direta entre a voltagem lida pela sonda (V) e o conteúdo de água no solo (θ).

Caracterização dos solos utilizados no estudo

A investigação foi conduzida no campo, em oito diferentes locais de amostragem, um na área experimental da Embrapa Cerrados e os outros sete na Bacia Experimental do Alto Rio Jardim, todos no Distrito Federal. Dos oito locais amostrados, sete são classificados como Latossolo Vermelho e um como Latossolo Vermelho-Amarelo, solos comumente encontrados em áreas do Bioma Cerrado (Reatto et al., 1998).

Nesses locais, foram instalados tubos de acesso para o uso das sondas PR2/6, seguindo as orientações do fabricante (Delta-T Devices Ltd., 2004).

Características dos solos nesses pontos são apresentadas na Tabela 1.

Como se pode observar na Tabela 1, o teor de argila dos solos analisados varia de 55 a 75%, o teor de matéria orgânica (MO) vai de 0,95 a 3,28% e a densidade dos solos (ρ_{solo}) está entre 0,88 e 1,12 g.cm⁻³.

Coleta dos dados

Na verificação do desempenho da sonda no monitoramento da umidade do solo em condições de campo, em cada um dos oito locais de amostragem e nas profundidades de leitura da sonda (10, 20, 30, 40, 60 e 100 cm), foram efetuadas medidas simultâneas da umidade do solo com a sonda PR2/6 e com o uso do método gravimétrico.

Tabela 1 - Características dos solos utilizados na execução do trabalho.

ID local	Profundidade m	Argila %	Silte %	Arcia %	MO %	ρ_{solo} g/cm ³
1	10	62,50	27,60	9,90	3,28	0,90
1	20	59,47	30,98	9,55	3,06	0,92
1	30	59,23	31,96	8,81	2,68	0,97
1	40	65,79	25,70	8,52	2,21	0,92
1	60	68,54	22,87	8,59	1,38	0,95
1	100	70,04	21,24	8,72	1,41	0,93
2	10	55,13	33,25	11,62	3,19	0,94
2	20	55,86	34,29	9,84	2,78	0,92
2	30	60,57	28,98	10,45	2,58	0,91
2	40	61,86	28,33	9,81	2,37	0,90
2	60	64,76	25,72	9,52	1,50	0,88
2	100	66,34	24,16	9,50	1,05	0,92
3	10	55,25	32,73	12,02	3,00	0,97
3	20	63,77	25,19	11,04	2,49	0,96
3	30	70,54	19,44	10,02	2,19	0,96
3	40	69,01	21,65	9,35	1,86	0,93
3	60	71,26	19,15	9,59	1,60	0,93
3	100	72,18	17,52	10,30	1,18	0,92
4	10	69,90	18,99	11,11	1,00	0,93
4	20	70,79	18,57	10,64	1,00	0,95
4	30	71,94	17,20	10,86	1,00	0,91
4	40	71,06	18,60	10,34	1,00	0,91
4	60	70,89	19,32	9,78	1,47	0,92
4	100	74,81	15,91	9,28	1,00	0,91
5	10	64,20	23,92	11,88	2,93	0,92
5	20	65,04	24,54	10,42	2,63	0,89
5	30	70,30	18,69	11,01	2,15	0,93
5	40	72,37	17,06	10,57	1,71	0,93
5	60	73,38	16,25	10,37	1,11	0,94
5	100	72,11	17,57	10,32	1,00	0,94
6	20	70,79	18,57	10,64	1,00	0,95
6	30	71,94	17,20	10,86	1,00	0,91
6	40	71,06	18,60	10,34	1,00	0,91
6	60	70,89	19,32	9,78	1,47	0,92
6	100	74,81	15,91	9,28	1,00	0,91
7	10	53,51	29,51	16,99	2,49	0,99
7	20	56,84	28,06	15,11	2,22	0,88
7	30	56,84	28,06	15,11	2,22	0,88
7	40	64,25	23,63	12,12	1,00	0,88
7	60	64,25	23,63	12,12	1,00	0,88
7	100	64,25	23,63	12,12	1,00	0,88
8	10	60,01	3,79	36,20	2,09	1,05
8	20	60,52	3,68	35,79	1,75	1,04
8	30	62,10	3,72	34,18	1,73	1,12
8	40	62,09	3,79	34,12	1,42	1,02
8	60	64,11	2,54	33,36	1,28	0,99
8	100	63,80	2,30	33,89	0,95	1,08

Na medição com a sonda, efetuaram-se três repetições de coleta de dados. Em cada uma delas, a sonda era girada em 120 graus para a verificação de alguma variação significativa no resultado da leitura. Em função das características dos solos estudados, a sonda foi configurada para utilizar os parâmetros originais de suas equações internas (a_0 e a_1) definidos para solos minerais pelo fabricante.

Na coleta de amostras deformadas de solo para a determinação da umidade pelo método gravimétrico, o qual implica na abertura de furos no solo com a utilização de um trado, teve-se o cuidado de retirar essas amostras, no mínimo, a um metro e meio de distância do local em que estava instalado o tubo de acesso, para evitar a interferência dessas intervenções em medições posteriores de umidade com a sonda, e no máximo a três metros, para manter certa representatividade da amostra em relação ao local de leitura com a sonda. A conversão de umidade em base gravimétrica em volumétrica, para permitir a comparação entre os métodos, foi efetuada por meio da utilização dos dados de densidade do solo em cada ponto de amostragem, apresentados na Tabela 1.

Na realização do trabalho foram conduzidas onze campanhas de medição entre os dias 25/10/2007 e 06/08/2008, englobando períodos chuvosos e secos na região. O intervalo entre as medições foi de aproximadamente um mês. Cada local foi visitado pelo menos duas vezes. Em cada campanha eram coletados dados em dois ou três locais, totalizando 27 visitas aos pontos. Assim, como em cada visita eram levantadas informações em seis profundidades, foram obtidos 162 dados para a avaliação dos resultados das sondas.

Análise de consistência dos dados

Para evitar que os erros inerentes ao método gravimétrico provocassem qualquer viés na avaliação dos resultados obtidos com as sondas, antes de utilizá-los, efetuou-se uma análise de consistência desses dados. Foram eliminados todos os resultados do método gravimétrico em que o coeficiente de variação da umidade do solo nas três repetições efetuadas foi superior a 3%.

Além disso, para minimizar erros grosseiros nos resultados obtidos com as sondas, seus dados também foram consistidos antes da análise final do trabalho, sendo eliminados aqueles identificados com base nos seguintes critérios:

- a) Dados fora da curva que relaciona a voltagem (V) e o conteúdo de água no solo (θ) fornecido pela sonda, indicando provável erro de leitura;
- b) Dados discrepantes das demais umidades medidas ao longo do perfil de solo, indicando possível problema de contato entre o solo e o tubo de acesso;
- c) Dados sistematicamente discrepantes dos demais quando efetuada uma comparação gráfica com os dados gravimétricos, após um primeiro processo de calibração da sonda, indicando possível problema de contato entre o solo e o tubo de acesso em determinado local e profundidade.

Análise dos dados consistidos

Na etapa de avaliação do desempenho da sonda Delta-T PR2/6 no caso em estudo, o primeiro passo consistiu na comparação direta entre os 162 resultados de umidade do solo lidos com a sonda e os correspondentes dados médios consistidos obtidos com o uso do método gravimétrico. Ainda com base nesses dados, efetuou-se a calibração da equação da sonda utilizando-se o método dos mínimos quadrados. Com a equação calibrada, os dados de voltagem (V) da sonda foram convertidos em novos valores de umidade do solo (θ). Finalmente, efetuou-se a comparação entre os dados obtidos com a equação calibrada da sonda e os respectivos dados médios obtidos a partir do uso do método gravimétrico. Destaca-se que, nessa etapa do trabalho, nas duas vezes em que foram confrontados os dados de umidade do solo medidos com a sonda e com o método gravimétrico, antes e depois da calibração da equação, a comparação entre eles foi feita com base na análise dos seguintes parâmetros estatísticos:

- a) Coeficiente de determinação (R^2);
- b) Coeficiente de correlação de Pearson (r);
- c) Coeficiente de concordância (d) com a reta 1:1 (Willmott, 1982);
- d) Índice de desempenho (c) do modelo (Camargo e Sentelhas, 1997).

O coeficiente de determinação (R^2) indica o quanto a variação de uma determinada variável explica a variabilidade de outra variável. No caso em estudo, esse parâmetro 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.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) indica o grau de relação existente entre duas variáveis. A determinação desse coeficiente é efetuada por meio da seguinte equação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \tag{3}$$

em que:
 x_i e y_i : valores medidos das variáveis x e y;
 \bar{x} e \bar{y} : médias dos valores medidos de x e y.

Os valores de coeficientes de correlação de Pearson (r) encontrados foram classificados de acordo com os critérios adotados por Shimakura (2006), apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação das correlações de acordo com o coeficiente de correlação (Shimakura, 2006).

Coeficiente de Correlação (r)	Correlação
0,00 - 0,19	Muito fraca
0,20 - 0,39	Fraca
0,40 - 0,69	Moderada
0,70 - 0,89	Forte
0,90 - 1,00	Muito forte

O coeficiente de concordância de Willmott (1982) indica o grau de afastamento dos valores estimados em relação aos dados observados. Ou seja, esse coeficiente (d) avalia a relação média entre a linha de tendência linear gerada entre os dados estimados e observados e a reta 1:1. Os valores de d variam entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 1, maior a concordância entre os dados estimados e observados. Esse índice é dado pela seguinte equação (Willmott, 1982):

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \tag{4}$$

em que:
 P_i : valor estimado;
 O_i : valor observado;
 \bar{O} : média dos valores observados.

O índice de desempenho (c) desenvolvido por Camargo e Sentelhas (1997) agrupa, em uma única análise, os coeficientes de correlação (r) e de concordância (d), conforme apresentado a seguir:

$$c = r * d \tag{5}$$

Na Tabela 3, são apresentados os critérios de interpretação do índice de desempenho (Camargo e Sentelhas, 1997).

Tabela 3 - Critérios de interpretação do desempenho das sondas em estimar as umidades do solo determinadas com o uso do método gravimétrico (adaptado de Camargo e Sentelhas, 1997).

Índice de desempenho (c)	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76-0,85	Muito bom
0,66-0,75	Bom
0,61-0,65	Mediano
0,51-0,60	Ruim
0,41-0,50	Muito ruim
< 0,40	Péssimo

Para finalizar, efetuou-se a análise da distribuição estatística dos valores absolutos do erro em termos de teor de umidade do solo em base volumétrica (% vol.). O modelo utilizado para a representação dessa distribuição foi o de Skaggs et al. (2001) modificado por Silva et al. (2004), descrito da seguinte forma:

$$P_E = \frac{100}{1 + \left(\frac{100}{P_0} - 1\right) e^{-k(E - E_{min})^n}} \tag{6}$$

em que:

E: erro absoluto acumulado (% vol.);

E_{min} : erro absoluto correspondente ao limite superior do primeiro intervalo em que os dados foram discretizados na análise da distribuição dos erros (% vol.)

P_E : percentual de amostras com valores absolutos de erro menores ou iguais a E (%);

P_0 : percentual de amostras com valores absolutos de erro menores ou iguais a E_{min} (%)

k e n: parâmetros de ajuste do modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 4, são apresentados os coeficientes de variação das medições, em três repetições, do teor de umidade dos solos analisados pelo método gravimétrico.

Tabela 4 - Coeficientes de variação do teor de umidade das amostras de solo analisadas pelo método gravimétrico.

Amostra Nº	Coeficiente de variação (%)					
	Profundidade (cm)					
	10	20	30	40	60	100
1	15,22*	6,18*	4,51*	7,23*	4,69*	2,14
2	2,87	12,72*	2,59	6,17*	1,56	1,68
3	3,12*	3,01*	1,51	1,76	4,06*	2,79
4	3,09*	2,87	6,03*	2,49	2,88	3,97*
5	2,64	3,18*	1,21	2,00	3,70*	4,67*
6	0,84	2,35	3,62*	1,96	0,57	1,45
7	4,34*	1,95	1,94	1,41	0,86	1,00
8	2,17	0,73	2,43	1,04	1,94	2,17
9	3,56*	2,40	1,77	0,80	1,48	2,38
10	2,15	1,48	1,07	1,35	0,65	0,84
11	6,99*	0,98	0,83	1,38	1,09	0,41
12	3,00	7,93*	0,95	3,34*	0,78	1,61
13	0,53	1,86	1,65	2,21	2,75	2,18
14	6,15*	4,30*	1,65	3,01*	2,41	1,24
15	0,98	0,48	21,38*	3,57*	7,65*	7,36*
16	2,49	2,65	1,54	1,61	0,85	0,50
17	1,28	1,37	4,87*	4,35*	1,90	0,49
18	2,74	3,69*	2,22	0,73	1,79	1,11
19	6,52*	2,61	2,01	1,12	1,06	0,70
20	1,96	1,81	1,52	1,17	0,71	2,64
21	1,52	0,55	1,46	0,90	0,20	0,33
22	9,43*	2,29	1,16	0,96	2,33	1,69
23	19,51*	6,04*	2,17	1,24	0,59	0,94
24	4,00*	1,38	0,18	0,51	1,88	1,29
25	3,05*	1,41	1,59	1,50	0,60	2,11
26	6,65*	2,73	0,37	0,33	1,72	1,13
27	1,77	2,16	0,81	7,81*	0,37	7,60*
Excluídos	13	8	5	7	4	4

* Repetições de dados com coeficiente de variação maior que 3%.

Como se pode observar na Tabela 4, das amostras coletadas em 162 locais e profundidades, 41 foram descartadas devido ao fato de o coeficiente de variação das três repetições efetuadas em cada um desses ter superado 3%. Assim, foram selecionados 121 valores médios de umidade do solo obtidos com o método gravimétrico para a avaliação das medições realizadas com a sonda Delta-T PR2/6.

Os resultados apresentados na Tabela 4 indicam a existência de uma maior variabilidade nos dados de umidade do solo obtidos com o método gravimétrico próximo à superfície, principalmente a 10 cm de profundidade. A dificuldade de retirada dessa amostra sem a contaminação pelo solo seco da superfície e o fato dessa camada de solo ser hidrolo-

gicamente mais dinâmica são duas hipóteses para explicar essa maior variabilidade encontrada nos valores de umidade do solo em profundidades mais rasas.

Na investigação dos dados das sondas que não seguiam a curva que relaciona a voltagem lida (V) e o respectivo conteúdo de água no solo (θ), não foram detectados erros de leitura.

Na análise de possíveis problemas de contato entre o solo e o tubo de acesso, efetuada por meio da avaliação gráfica dos perfis de umidade e da comparação com demais dados obtidos com o método gravimétrico, descartaram-se 12 dados levantados.

Dessa forma, foram utilizados 109 pontos amostrais para a comparação entre resultados médios obtidos com o método gravimétrico e aqueles levantados com a sonda Delta-T PR2/6.

Na Figura 1, são apresentados os 109 dados coletados com a sonda Delta-T PR2/6 utilizados na seqüência do trabalho, bem como a curva de representação da relação entre os seus valores lidos de voltagem (V) e de conteúdo de água no solo (θ).

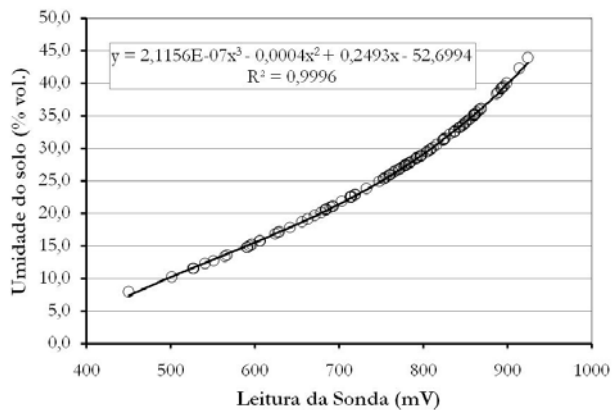


Figura 1 - Relação entre os valores de voltagem (V) e o teor de umidade do solo (θ) da sonda Delta-T PR2/6 utilizada.

Analisando-se a Figura 1, observa-se que a relação entre a voltagem lida (V) e os seus respectivos conteúdos de água no solo (θ) pode ser adequadamente descrita por uma equação polinomial de terceiro grau.

Na Figura 2, é apresentado o gráfico que confronta os dados obtidos no campo utilizando a sonda Delta-T PR2/6 com sua configuração padrão para solos minerais e os valores médios determinados com o método gravimétrico para os mesmos pontos.

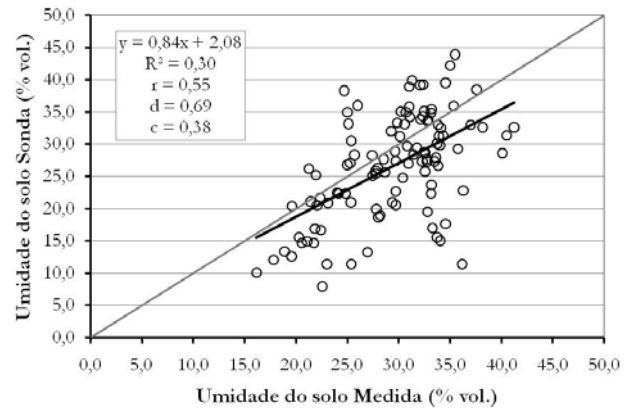


Figura 2 - Comparação entre os valores de umidade do solo obtidos com a sonda Delta-T PR2/6 e os medidos com o método gravimétrico.

Como se observa na Figura 2, o baixo valor de R^2 indica que a variabilidade dos resultados da sonda não permite explicar adequadamente a variabilidade dos dados médios medidos com o método gravimétrico. O valor de r indica a existência de uma correlação “moderada” entre os dados obtidos com a sonda e os determinados com o método gravimétrico. O valor do coeficiente de concordância ($d = 0,69$) evidencia que a relação média entre a linha de tendência linear gerada entre os dados da sonda PR2/6 e os obtidos com o método gravimétrico, apesar da dispersão dos dados, não está tão distante da reta 1:1. O traçado dessa linha de tendência média mostra que os dados da sonda, em geral, subestimam os dados medidos com o método gravimétrico. Finalmente, a análise global dos dados obtidos com a sonda, consolidada no valor do parâmetro c (índice de desempenho global da técnica), indica que a sonda PR2/6 tem desempenho classificado como “péssimo” de acordo com a escala apresentada por Camargo e Sentelhas (1997). Assim, com os parâmetros de fábrica para solos minerais, utilizando apenas uma equação, ela não pode ser utilizada adequadamente em substituição do método gravimétrico na determinação da umidade dos solos analisados. De tal modo, buscou-se a calibração das equações das sondas com base nos dados de umidade do solo obtidos com o método gravimétrico (Figura 3).

Como se pode observar na Figura 3, o valor do coeficiente de determinação (R^2) proveniente da relação entre as voltagens (V) medidas com as sondas e os valores de umidade do solo (θ) obtidos com o método gravimétrico também é baixo (0,32), indicando a dificuldade de relacionamento dessas variá-

veis. Destaca-se que, com tamanha dispersão dos dados, o uso de equações polinomiais de maior grau não melhora significativamente o valor do R^2 apresentado na Figura 3.

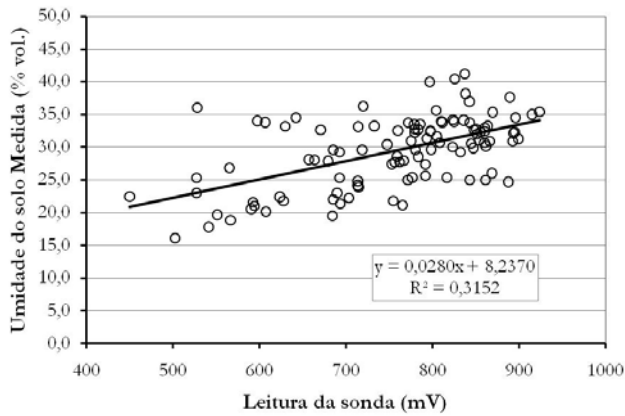


Figura 3 - Calibração da sonda Delta-T PR2/6 com base nos dados médios de umidade do solo medidos com o método gravimétrico.

Utilizando-se a equação calibrada para a transformação das leituras de voltagem das sondas (Figura 3), efetuou-se nova análise da possibilidade de uso desses equipamentos na estimativa do teor de umidade do solo determinado pelo método gravimétrico (Figura 4).

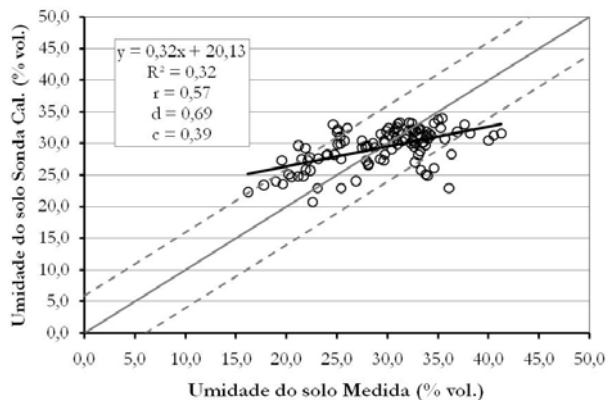


Figura 4 - Comparação entre os valores de umidade do solo obtidos com a equação calibrada da sonda Delta-T PR2/6 e os medidos com o método gravimétrico.

Comparando-se os resultados apresentados nas Figuras 2 e 4, nota-se uma pequena melhora na relação entre a umidade do solo medida com a sonda e com o método gravimétrico. Na Figura 4, pode-

se observar que as mudanças nos parâmetros estatísticos de comparação entre os dados obtidos após a calibração das sondas e aqueles determinados com o método gravimétrico não foram suficientes para melhorar significativamente o desempenho do equipamento analisado, que continuou apresentando resultado classificado como “péssimo” na avaliação geral. Ainda na Figura 4, as retas paralelas à reta 1:1 representam os limites inferiores e superiores do erro dentro dos quais o fabricante da sonda (Delta-T Devices Ltd., 2004) indica estar inserida a precisão do equipamento, de 6% de variação no teor de umidade do solo em base volumétrica. Nota-se que, por vezes, esses limites foram superados. Para uma melhor discretização dessa informação, na Figura 5 é apresentado o resultado da análise de distribuição dos erros obtidos entre os dados da sonda após a calibração de sua equação e os valores médios medidos com o método gravimétrico.

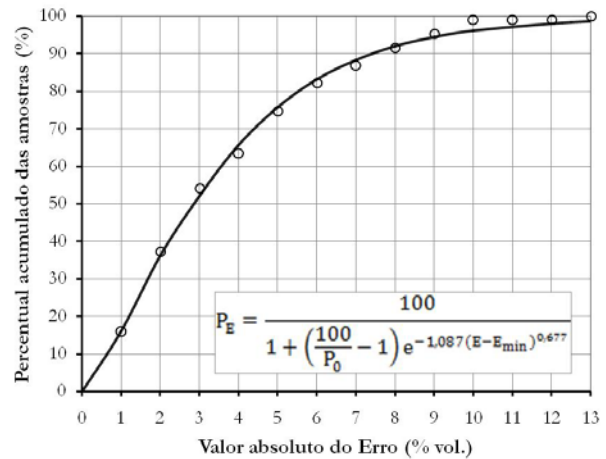


Figura 5 - Distribuição estatística dos valores absolutos dos erros (% vol.) entre as leituras da sonda calibrada e os dados obtidos com o método gravimétrico.

Conforme apresentado na Figura 5, cerca de 80% das 109 amostras utilizadas na comparação dos dados das sondas e determinados com o método gravimétrico alcançaram erros inferiores a 6% no teor de umidade em base volumétrica. Cabe destacar que a utilização de um erro absoluto de até 6% no teor de umidade em base volumétrica como referência ($0,06 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) se baseia apenas na declaração do fabricante das sondas de que essa é a precisão esperada no uso de seus equipamentos considerando apenas uma relação entre a voltagem e a umidade do solo. Contudo, para a maioria das aplicações este é um valor de erro considerado elevado. No

caso em estudo, os valores de umidade do solo medidos em diferentes locais e épocas do ano, utilizando o método gravimétrico, variaram de 16 a 41% em base volumétrica, assim, 6% representa um erro relativo de 24% dentro desse intervalo, percentual muito elevado. Considerando que um erro absoluto de 2% no teor de umidade seria um valor aceitável, de acordo com os resultados apresentados na Figura 5, mais de 60% das amostras extrapolariam esse limite.

Diante dos resultados obtidos, a busca de uma equação por ponto e por profundidade seria uma alternativa para verificar a viabilidade de uso do equipamento avaliado, o que demandaria grande esforço no processo de calibração.

Destaca-se que outros trabalhos também detectaram limitações quanto ao uso de sondas de capacitância. No relatório FAO/IAEA (2003) é apresentado um estudo de comparação de diversos sensores de medição de umidade do solo (sonda de nêutron; reflectômetros no domínio do tempo-TDR; e sondas de capacitância), em que a sonda Delta-T PR1/6 de perfil, similar a utilizada neste trabalho, foi a que apresentou os piores resultados em termos de precisão e acurácia. Evett et al. (2003), comparando diversos sensores elétricos 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 continuamente pesada, concluíram que a sonda Delta-T PR1/6 era o sensor de menor acurácia entre os testados, sendo os seus resultados os mais sensíveis a variações na temperatura e a distúrbios no solo durante a instalação do tubo de acesso em razão da menor quantidade de solo amostrada na medição. Esses autores ressaltam que essas limitações poderiam inviabilizar o uso desses equipamentos em condições de campo, como comprovado no presente trabalho.

CONCLUSÕES

1. Os resultados indicam que a sonda multi-sensor de capacitância Delta-T PR2/6, utilizando uma única relação entre a voltagem e o conteúdo de água no solo, não é capaz de substituir adequadamente o método gravimétrico no monitoramento do teor de umidade de Latossolos do Cerrado em condições de campo;
2. Mesmo após a calibração da sonda com os valores medidos pelo método gravimétrico,

cerca de 20% das amostras analisadas ainda apresentaram erro absoluto no teor de umidade do solo superior a $0,06 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, valor indicado pelo fabricante como erro padrão desses equipamentos.

AGRADECIMENTOS

Ao Ministério de Ciência e Tecnologia – MCT/CT-Hidro, à FINEP e à FINATEC, pelo apoio fornecido para a realização deste trabalho. Ao técnico José Roberto Leopoldino, da Embrapa Cerrados, e aos estagiários João Paulo, Elton e Felipe, alunos do curso de geografia da Universidade Estadual de Goiás – UEG, e Pierre, aluno do curso de agronomia da UPIS Faculdades Integradas, pela cooperação na obtenção dos dados de campo e laboratório.

REFERÊNCIAS

- BAIER, W.; ROBERTSON, G.W. (1968) The performance of soil moisture estimates as compared with the direct use of climatological data for estimating crop yields. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, v.5, p.17-31.
- BAUMHARDT, R.L.; LASCANO, R.J.; EVETT, S.R. (2000) Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. *Soil Science Society of America Journal*, Madison. v.64, p.1940–1946.
- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. (1997) Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.5, n1, p.89-97.
- DEAN, T.J.; BELL, J.P.; BATY, A.J.B. (1987) Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, Part I: Sensor design and performance. *Journal of Hydrology*, v.93, p.67-78.
- DELTA-T DEVICES LTD. (2004) Profile probe type PR2 user manual 2.0. Cambridge: Delta-t device Ltd, 42 p.
- EVETT, S.R.; STEINER, J.L. (1995) Precision of neutron scattering and capacitance type moisture gages based on field calibration. *Soil Science Society of America Journal*, Madison. v.59, p.961–968.
- EVETT, S.R.; TOLK, J.A.; HOWELL, T.A. (2003) Sensors for soil profile water content measurement: accuracy, axial response and temperature dependence. *Geophysical Research Abstracts*, v.5, 09944.

- EVETT, S.R.; TOLK, J.A.; HOWELL, T.A. (2006) Soil profile water content determination: sensor accuracy, axial response, calibration, temperature dependence, and precision. *Vadose Zone Journal*, Madison, v.5, p.894-907.
- FAO/IAEA – Food and Agriculture Organization/ International Atomic Energy Agency (2003) Comparison of soil-moisture sensors between neutron probe, time-domain reflectometry and capacitance probe. Report IAEA-311-CT00028, Viena, 14 p.
- HOPKINS, W. G. Correlation coefficient. Disponível em: <<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso: 22 jan. 2007.
- KELLEENERS, T.J.; SOPPE, R.W.G.; AYARS, J.E.; SKAGGS, T.H. (2004a) Calibration of capacitance probe sensors in a saline silty clay soil. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.68, p.770-778.
- KELLEENERS, T.J.; SOPPE, R.W.G.; ROBINSON, D.A.; SCHAAP, M.G.; AYARS, J.E.; SKAGGS, T.H. (2004b) Calibration of capacitance probe sensors using electric circuit theory. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.68, p.430-439.
- PALTINEANU, I.C.; STARR, J.L. (1997) Real-time soil water dynamics Using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.61, p.1576-1585.
- RAWS, W.J.; AHUJA, L.R.; BRAKENSIEK, D.L.; SHIRMOHAMMADI, A. (1992) Infiltration and soil water movement. In: MAIDMENT, D.R. (Ed.) *Handbook of hydrology*. New York: McGraw Hill, p.5.1-5.51.
- REATTO, A.; CORREIA, J.R.; SPERA, S.T. (1998) Solos do bioma Cerrado: aspectos pedológicos. In: Sueli M. Sano; Semiramis Pedrosa de Almeida. (Org.). *Cerrado: ambiente e flora*. 1 ed. Planaltina-DF: EMBRAPA-CPAC, p. 47-83.
- SHIMAKURA, S.E. (2006) Interpretação do coeficiente de correlação. Disponível em: <<http://leg.ufpr.br/~shimakur/CE003/node74.html>>. Acesso em: 20 Nov. 2008.
- SILVA, E.M.; LIMA, J.E.F.W.; RODRIGUES, L.N.; AZEVEDO, J.A. (2004) Comparação de modelos matemáticos para o traçado de curvas granulométricas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.39, n.4, p.363-370.
- SKAGGS, T.H.; ARYA, L.M.; SHOUSE, P.J.; MOHANTY, B.P. (2001) Estimating particle-size distribution from limited soil texture data. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v 65, n.4, p.1038-1044.
- VAN BAVEL, M.; NICHOLS, C. (2002) Theta and profiler soil moisture probes - accurate impedance measurement devices - new applications. Disponível em: <<ftp://ftp.dynamax.com/References/95%20Theta%20and%20profiler%20soil%20moisture%20probes.pdf>>. Acesso em: 19 nov. 2008.
- WILLMOTT, C. J. (1982) Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorological Society*, v.63, n.11, p.1309-1313.

Evaluation of The Capacitance Probe Performance in Monitoring Cerrado Oxisoil Moisture Content Under Field Conditions

ABSTRACT

Soil moisture measurements are essential in soil-water balance studies. There are different methods, direct and indirect, for measuring the soil-water content, each one with advantages and disadvantages. Capacitance sensors allow the construction of highly portable profile probes, which, with a single equipment, allow measuring and storing these data from different locations, depths, and time intervals, which can constitute an excellent tool for monitoring and studying the processes that govern soil-water dynamics. However, the use of that alternative depends on verification of generated data quality. Thus, the objective of this paper was to verify the applicability of a capacitance profile probe PR2/6 of Delta-T Devices Ltd., for measuring soil-water content in the field of typical Cerrado Biome soils in different monitoring locations. At eight locations, six depths, and different seasons of the year, 162 soil moisture data were obtained with the selected probe and, simultaneously, gravimetric water-contents were measured to compare the results at each point. The results indicate that the Delta-T PR2/6 capacitance profile probe, using a unique relationship between the voltage and soil-water content, cannot replace the gravimetric method to monitor the soil moisture of Cerrado Biome Oxisoils appropriately under field conditions.

Key-words: *monitoring, hydrometry, Delta-T probe.*