

**Calibração e Validação de
Sensor Dielétrico para Estimativa
de Teor de Água em Solos do Cerrado**



ISSN 1676-918X

Novembro, 2008

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 223

Calibração e Validação de Sensor Dielétrico para Estimativa de Teor de Água em Solos do Cerrado

*Marcos Aurélio Carolino de Sá
João de Deus Gomes dos Santos Junior
Edson Eyji Sano*

Embrapa Cerrados
Planaltina, DF
2008

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Cerrados

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza

Caixa Postal 08223

CEP 73310-970 Planaltina, DF

Fone: (61) 3388-9898

Fax: (61) 3388-9879

<http://www.cpac.embrapa.br>

sac@cpac.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: *José de Ribamar N. dos Anjos*

Secretária-Executiva: *Maria Edilva Nogueira*

Supervisão editorial: *Fernanda Vidigal Cabral de Miranda*

Equipe de revisão: *Fernanda Vidigal Cabral de Miranda,*

Francisca Eljani do Nascimento,

Jussara Flores de Oliveira Arbués

Normalização bibliográfica: *Rosângela Lacerda de Castro*

Editoração eletrônica: *Fabiano Bastos*

Capa: *Fabiano Bastos*

Fotografia da capa: *Waldir Pereira Dias - Embrapa Soja*

Impressão e acabamento: *Divino Batista de Souza*

Alexandre Moreira Veloso

Impresso no Serviço Gráfico da Embrapa Cerrados

1ª edição

1ª impressão (2008): 100 exemplares

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Cerrados**

S111c Sá, Marcos Aurélio Carolino de.

Calibração e validação de sensor dielétrico para estimativa de teor de água em solos do Cerrado / Marcos Aurélio Carolino de Sá, João de Deus Gomes dos Santos Junior, Edson Eyji Sano. – Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2008.

32 p. — (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Cerrados, ISSN 1676-918X; 223).

1. Solo. 2. Condutividade hidráulica. 3. Relação solo - água. I. Santos Junior, João de Deus Gomes dos. II. Sano, Edson Eyji. III. Título. IV. Série

631.432 – CDD 21

© Embrapa 2008

Sumário

Resumo	5
Abstract.....	6
Introdução.....	7
Material e Métodos.....	8
Resultados e discussão	17
Conclusões.....	30
Agradecimentos	30
Referências	30

Calibração e Validação de Sensor Dielétrico para Estimativa de Teor de Água em Solos do Cerrado

Marcos Aurélio Carolino de Sá¹; João de Deus Gomes dos Santos Junior²; Edson Eyji Sano³

Resumo

A capacidade de retenção de água pelo solo depende basicamente da sua textura e estrutura. Para determinação do teor de água do solo, o método padrão é o gravimétrico, que, embora preciso, é limitado quando se exigem estimativas rápidas ou um número grande de determinações em intervalos de tempo curtos. Isso tem motivado o desenvolvimento de sensores para estimativa rápida do teor de água no solo. Este trabalho teve por objetivo avaliar a precisão de um sensor dielétrico para estimativa do teor de água volumétrico do solo em condições de campo no Cerrado. A calibração foi feita em uma pedosequência localizada na Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF. Foram analisados três solos: Neossolo Quartzarênico (RQ), Latossolo Vermelho - Amarelo textura média (LVAm) e Latossolo Vermelho Amarelo textura muito argilosa (LVAA). A validação dos modelos gerados foi feita em talhão com produção de grãos no Distrito Federal, composto por Latossolos com textura variando de média a muito argilosa. Concluiu-se que o teor de água volumétrico do solo pode ser estimado a partir da tensão fornecida pelo equipamento, com um erro de até $\pm 0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e que a inclusão da textura nos modelos melhora sensivelmente a estimativa do teor volumétrico de água do solo.

Termos para indexação: Umidade de solos, textura, sensor de umidade, estimativa, mapeamento.

¹ Engenheiro Agrônomo, D.Sc., Pesquisador da Embrapa Cerrados, carolino@cpac.embrapa.br

² Engenheiro Agrônomo, D.Sc., Pesquisador da Embrapa Cerrados, jdsantos@cpac.embrapa.br

³ Geólogo, Ph.D., Pesquisador da Embrapa Cerrados, sano@cpac.embrapa.br

Calibration and Validation of a Dielectric-Based Sensor for Estimating Soil-Water Content of Cerrado Soils

Abstract

The soil water retention capacity depends basically on their texture and structure. Gravimetry is the standard method for determining water content in soils. Although precise, it becomes limited when there is a requirement for rapid estimations or the number of estimations are large within a short time period. Such aspect has motivated the development of sensors for rapid estimation of soil moisture content. The objective of this work is to evaluate the precision of a sensor based on dielectric functioning – the hydro probe – to estimate the volumetric water content of Cerrado soils under the field conditions. The calibration was conducted in a pedosequence located in the Embrapa Cerrados experimental field in Planaltina, DF. We analyzed three soils: sandy soil, Yellow-Red Latossol with medium texture and Yellow-Red Latossol with very clayey texture. The validation of generated models was conducted in Latossols of Federal District with texture varying from medium to very clayey and with ongoing grain production. It was concluded that the volumetric water content can be estimated through the tension provided by the equipment, with an error smaller than $\pm 0.06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. The consideration of texture in the modelling improved the volumetric soil moisture estimation significantly.

Index terms: soil moisture, soil texture, humidity sensor, estimative, soil mapping

Introdução

Os solos funcionam como suporte físico e reservatório de água e nutrientes para plantas. A produção vegetal é afetada pela retenção de água pelo solo, a qual depende basicamente da sua textura e estrutura. A textura é uma característica intrínseca do solo, herdada do material de origem e não é alterada pelo manejo, enquanto a estrutura é influenciada basicamente pela mineralogia e conteúdo de matéria orgânica (RESENDE et al., 2002). Essas características possuem grande interesse agrícola e ambiental.

O termo “umidade” é, às vezes, utilizado para designar o “teor de água”, sendo este último mais apropriado do ponto de vista quantitativo. Já o termo “conteúdo de água” diz respeito à quantidade de água armazenada (expressa em mm) até uma dada profundidade do solo, comumente a profundidade efetiva do sistema radicular (ANDRADE et al., 2008). O método padrão para determinação do teor de água do solo é o gravimétrico, em que é obtida a massa de uma amostra – simples ou composta, deformada ou indeformada - na condição em que foi coletada e depois de secada por 24 horas em estufa. O teor gravimétrico de água (U) é expresso em massa de água por massa de solo (g g^{-1} , kg kg^{-1} , ton ton^{-1}). Multiplicando-se U pela densidade do solo e dividida pela densidade da água (respeitando-se as respectivas unidades: g dm^{-3} , kg dm^{-3} , ton m^{-3}), obtém-se numericamente o teor volumétrico de água (θ), expresso em volume de água por volume de solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) (CLAESSEN, 1997; SEYFRIED; MURDOCK, 2004).

Embora seja preciso e direto, esse método é limitado quando se requer informações rápidas (em tempo quase real) ou se tem um número muito grande de determinações em intervalos de tempo curtos, seja no manejo de irrigação ou na pesquisa quando envolve medições do teor de água no solo. Esse fato tem motivado o desenvolvimento de métodos para estimativa rápida do teor de água no solo, tais como: o método do fogareiro, descrito em Pacheco e Dias Júnior (1990); o já obsoleto método de Steady (ANDRADE et al., 2008); os métodos baseados em

sensores ou sondas, como reflectometria no domínio do tempo ou TDR (TOPP et al., 1980); os sensores do tipo capacitivo ou reflectometria no domínio da frequência ou FDR (ROBINSON; DEAN, 1993; NADLER; LAPID, 1996); os sensores dielétricos (SEYFRIED; MURDOCK, 2004); ou outros métodos, como sonda de nêutrons, sonda de raios gama, ressonância nuclear magnética, fibra ótica e métodos geofísicos como radar, microondas e ultrassom (ANDRADE et al., 2008). Entretanto, muitos desses métodos requerem equipamentos que não são práticos para uso operacional ou apresentam custo elevado e alguns deles proporcionam riscos provenientes da radiação, como a sonda de raios gama.

Foi demonstrado em estudos prévios que sensores dielétricos proporcionam alta correlação com θ , apresentando potencial para medições quantitativas (SEYFRIED; MURDOCK, 2004; SEYFRIED et al., 2005). Entretanto, esses estudos foram feitos em condições de laboratório e com solos de clima temperado, distintos dos solos do Bioma Cerrado.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a precisão de um sensor com princípio de funcionamento dielétrico para estimativa do teor de água volumétrico do solo em condições de campo no Cerrado.

Material e Métodos

Equipamento utilizado

Foi utilizado um equipamento de princípio dielétrico marca *Stevens*, modelo *Hydra Probe*[®]. O sensor é alimentado por uma bateria alcalina de 9 V, e a parte que é inserida no solo (Fig. 1A) possui quatro hastes de metal de 5,8 cm de comprimento, sendo uma central e três ao redor, em formato de triângulo equilátero com 2,2 cm de lado (Fig. 1B). Uma vez inserida no solo e com o equipamento ligado (Fig. 1C), a haste central propaga um sinal eletromagnético de 50 MHz de frequência que é receptado pelas hastes laterais, sendo as tensões medidas em Volts (V) por um multímetro convencional (Fig. 1D). Essas voltagens correspondem ao comportamento refletido da onda eletromagnética,

a qual varia em função do teor volumétrico de água no solo. Maiores detalhes sobre o princípio de funcionamento desse equipamento são descritos em Seyfried e Murdock (2004) e Seyfried et al. (2005).

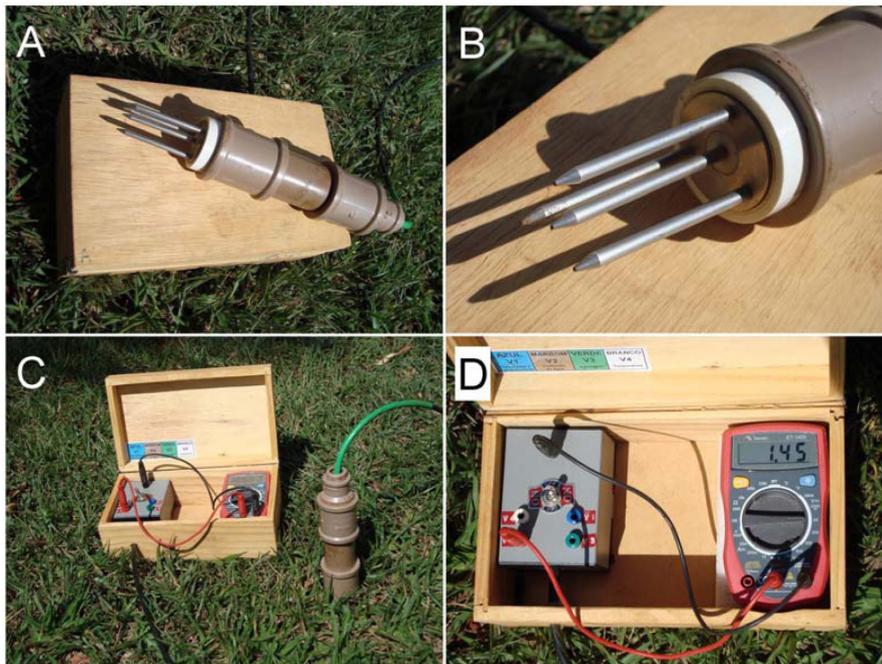


Fig. 1. Detalhes do equipamento utilizado (*Hydra probe*[®]). Sonda com hastes, sobre a caixa do equipamento (A); detalhe das hastes (B); Sonda inserida no solo durante a leitura (C); leitura feita no multímetro, em Volts (D).

Durante a realização de ensaios preliminares, constatou-se que, uma vez inserida a haste no solo e ligado o aparelho, ocorre diminuição nos valores de voltagem, a qual é mais acentuada quando a bateria já se encontra fraca, conforme pode ser observado na Fig. 2. Dessa forma, embora tenham sido utilizadas baterias novas durante a realização dos ensaios, optou-se por avaliar o efeito do tempo de leitura depois de ligado o aparelho, conforme descrito posteriormente.

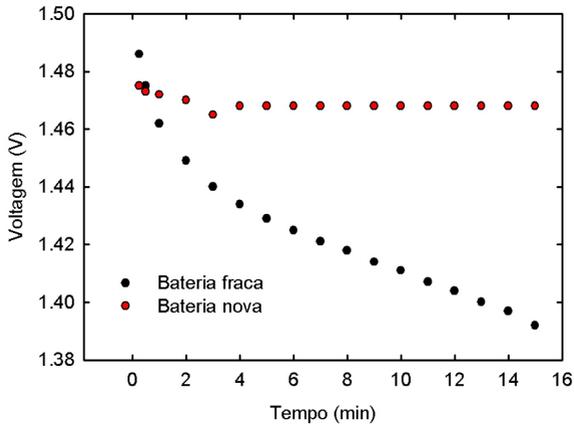


Fig. 2. Variação da voltagem (V) fornecida pelo aparelho em função do tempo em minutos, com a utilização de uma bateria nova e uma bateria fraca.

Solos estudados e procedimento utilizado para calibração

A calibração do equipamento foi feita em área experimental da Embrapa Cerrados, localizada em Planaltina, DF (latitude: 15° 35' 30" S; longitude: 47° 42' 30" W; e altitude: 1.100 m). O clima é do tipo tropical estacional (Aw), com precipitação média anual de 1.500 mm concentrada no período que vai de outubro a março. As médias das temperaturas mínimas e máximas são de 15,9 °C e 26,4 °C, respectivamente.

Foi escolhida uma pedosequência situada num transecto de aproximadamente 1.000 metros (Fig. 3A), onde foram avaliados três pontos em áreas sob pastagem, os quais apresentam entre si variação textural desde arenosa até muito argilosa, representados pelas classes Neossolo Quartzarênico (RQ), Latossolo Vermelho-Amarelo com textura média (LVAm) e Latossolo Vermelho-Amarelo com textura muito argilosa (LVAA) (SANTOS et al., 2006). As características físico-hídricas da camada 0 m – 0,05 m podem ser observadas na Fig. 4 e na Tabela 1.

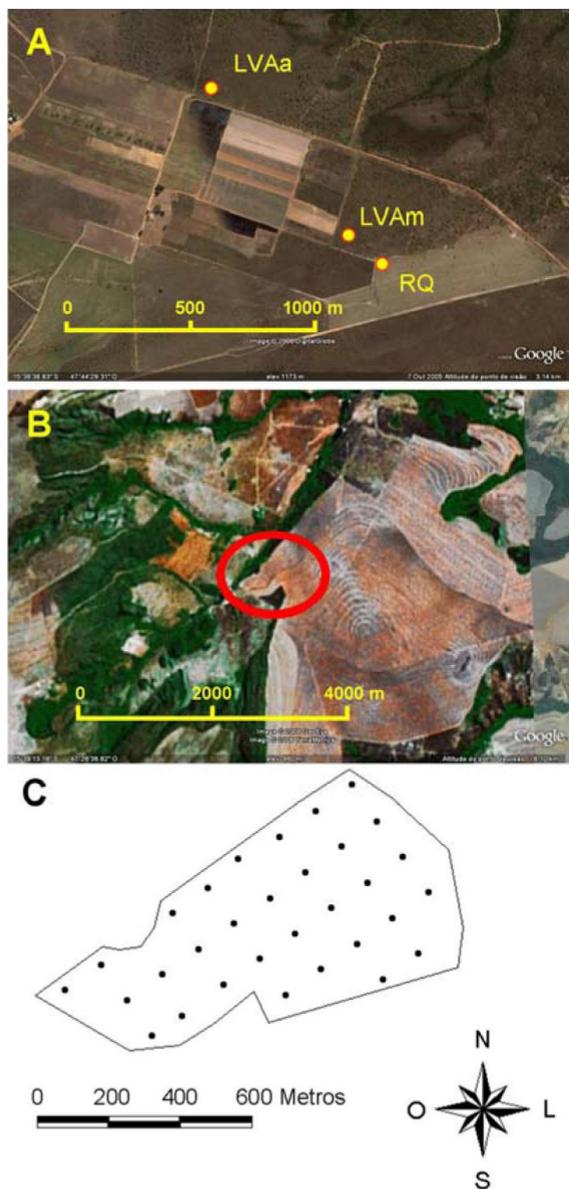


Fig. 3. Pontos localizados na área da Embrapa Cerrados utilizados para calibração do equipamento (A); Parte do talhão da Fazenda Sementes Primavera (circundada em vermelho) utilizada para validação dos modelos ajustados (B) e esquema da grade amostral de 125 m x 125 m utilizada para amostragem de validação dos modelos (C).

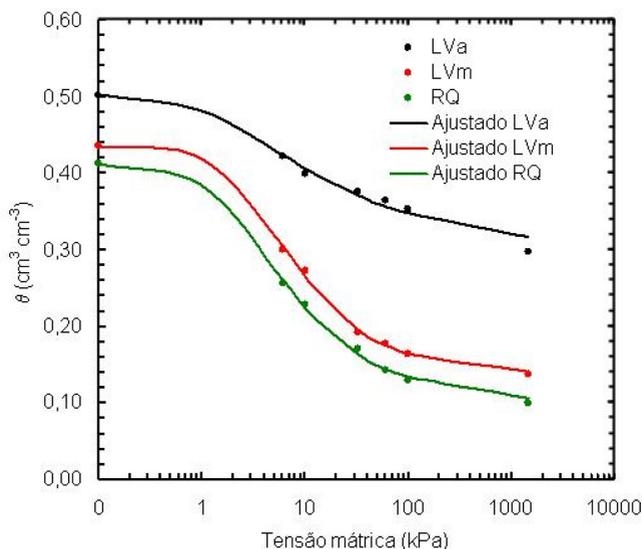


Fig. 4. Curvas características de retenção de água dos solos utilizados para calibração do equipamento, ajustadas pela equação de Van Genuchten (1980).

Tabela 1. Atributos físico-hídricos dos solos da Embrapa Cerrados utilizados para calibração do equipamento e ajuste dos modelos.

Atributo	Solo		
	RQ	LVAm	LVAa
textura (g kg⁻¹)			
Argila	80	196	728
Silte	30	30	28
Areia grossa	200	83	42
Areia fina	690	691	202
Areia total	890	774	244
Classificação textural ⁽¹⁾	Areia	Franco arenosa	Muito argilosa
Atributos físico-hídricos			
Densidade (g cm ⁻³)	1,42 ± 0,05	1,36 ± 0,11	1,15 ± 0,08
Macroporos (cm ³ cm ⁻³)	0,16	0,14	0,08
Microporos (cm ³ cm ⁻³)	0,26	0,30	0,42
Capacidade de campo ⁽²⁾ (cm ³ cm ⁻³)	0,26	0,30	0,42
Ponto de murcha ⁽³⁾ (cm ³ cm ⁻³)	0,10	0,14	0,30

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Atributo	Solo		
	RQ	LVA _m	LVA _a
Água disponível ⁽⁴⁾ (mm)	7,81	8,16	6,27
Água prontamente disponível ⁽⁵⁾ (mm)	6,39	6,80	3,42
Amplitude de θ observada ⁽⁶⁾	0,02 - 0,26	0,05 - 0,29	0,25 - 0,39
Parâmetros da equação de van Genuchten ⁽⁷⁾			
α (kPa ⁻¹)	0,4603	0,3207	0,5965
N (adimensional)	1,5814	1,6825	1,3399
θ_r (cm ³ cm ⁻³)	0,0990	0,1360	0,2960
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	0,4120	0,4350	0,5020
R ²	0,9980	0,9980	0,9760

¹ Lemos e Santos (1996).

² θ obtido na tensão de 6 kPa (RESCK; SILVA, 1990).

³ θ obtido na tensão de 1500 kPa.

⁴ θ 6kPa – θ 1500 kPa x 0,05 m x 1000.

⁵ θ 6kPa – θ 100 kPa x 0,05 m x 1000 (RESCK; SILVA, 1990).

⁶ valores de θ determinados em laboratório durante os ensaios de calibração.

⁷ Equação 4.

Os ensaios foram realizados durante a estação seca, com a finalidade de se evitar a interferência de chuvas no teor de água do solo. Assim, no dia 8 de agosto de 2007, estando os solos com teor de água abaixo do ponto de murcha na camada 0 m - 0,05 m, foi saturada uma área de 4 m² (2 m x 2 m) com auxílio de uma pipa tracionada por trator, adicionando-se aproximadamente 2.000 litros de água em cada ponto. Cessada a aplicação da água em cada ponto, as medições foram iniciadas 15 minutos após o desaparecimento da lâmina d'água da superfície do solo. Foram utilizados dois equipamentos idênticos, considerados como repetições, sendo as duas medições feitas simultaneamente em cada ponto. Para tanto, as hastes de 5,8 cm foram inseridas no solo, sendo, portanto, avaliada a camada de 0 m a 0,058 m de profundidade. Para avaliar o efeito do tempo na estimativa do teor volumétrico de água, foram feitas medidas em Volts nos seguintes tempos: 15, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, 660, 720, 780, 840 e 900 segundos. Logo após desligados os aparelhos, coletou-se, bem ao lado de cada sensor, na camada de 0 m a 0,05 m de profundidade, uma amostra indeformada de solo por meio

de um anel volumétrico de 5 cm de altura por 5 cm de diâmetro, a qual foi levada ao laboratório para determinação do teor de água gravimétrico (U), densidade aparente (D_s) e teor de água volumétrico (θ) do solo, conforme as equações 1, 2 e 3, seguindo procedimentos descritos em Claessen (1997):

$$U = \frac{Mu}{Ms} - 1 \quad \text{equação 1}$$

Em que

U é o teor gravimétrico de água no solo, em g g^{-1} .

Mu é a massa da amostra de solo nas condições em que foi coletada no campo, em gramas.

Ms é a massa da mesma amostra de solo após secagem em estufa a 105 °C por 24 h, em gramas.

$$D_s = \frac{Ms}{V} \quad \text{equação 2}$$

Em que:

D_s é a densidade aparente do solo, em g cm^{-3} .

Ms é a massa de solo no interior do anel volumétrico seco em estufa a 105 °C por 24 h, em gramas.

V é o volume do anel (98,17 cm^3).

$$\theta = \frac{U \times D_s}{Da} \quad \text{equação 3}$$

Em que:

θ é o teor volumétrico de água no solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

U é o teor gravimétrico de água no solo, em g g^{-1} .

D_s é a densidade aparente do solo, em g cm^{-3} .

Da é a densidade da água, em g cm^{-3} .

Em cada ponto, foi coletada também uma amostra indeformada na camada 0 m – 0,05 m para determinação da curva característica de retenção de água pelo método da centrifuga (FREITAS JÚNIOR; SILVA, 1984), sendo ajustado aos dados o modelo proposto por Van Genuchten (1980) por regressão não linear – Equação 4. Durante o ajuste, foram

adotados como θ_s e θ_r os valores observados, sendo ajustados apenas os parâmetros α e n . Com base nos dados de laboratório, considerou-se como capacidade de campo o valor de θ a 6 kPa, de acordo com Resck e Silva (1990), o ponto de murcha (θ a 1500 kPa), a água disponível ($\theta_{0,06} - \theta_{1500 \text{ kPa}}$), a macro e microporosidade conforme Claessen (1997), e a água prontamente disponível ($\theta_{0,06} - \theta_{100 \text{ kPa}}$), conforme Resck e Silva (1990).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha \times \Psi)^n\right]^{\left[1 - \frac{1}{n}\right]}} \quad \text{equação 4}$$

Em que:

θ ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) é o teor de água volumétrico.

θ_r e θ_s ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) são os teores de água residual e saturado, respectivamente.

Ψ (kPa) é a tensão de água no solo (módulo do potencial mátrico).

α e n parâmetros de ajuste do modelo.

Em cada ponto, a primeira leitura, feita logo após a saturação do solo, foi realizada na manhã do dia 8 de agosto de 2007. A segunda leitura foi feita no período da tarde do mesmo dia. As leituras subseqüentes ocorreram sempre no período da manhã dos dias 9, 10, 11, 13 e 16 de agosto de 2007. No dia 9 de agosto, ocorreu um incêndio na área adjacente ao solo LVAm. Embora não tenha atingido esse ponto, as leituras foram realizadas apenas nos solos RQ e LVAa por motivo de segurança. No dia 11 de agosto, foram feitas medições em solo seco (fora da área saturada). Entretanto, esse procedimento foi possível apenas nos solos RQ e LVAm, uma vez que não foi possível inserir a haste no solo LVAa, dada a consistência extremamente dura desse solo, quando seco, proporcionada pelo elevado teor de argila.

Foram ajustados modelos por regressão linear de θ ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) em função das respectivas voltagens (V) e tempos em minutos obtidos em cada solo, bem como de θ em função de V e dos teores de argila ou areia. Para tanto, foi utilizado o aplicativo estatístico SAEG versão 5.0. A decisão sobre a permanência ou retirada de uma variável do modelo

foi tomada com base na análise da significância dos coeficientes associados à variável. A comparação estatística entre os modelos, quando necessária, foi feita com base no teste F, seguindo procedimentos descritos em Motulsky e Christopoulos (2003). Para equações lineares com apenas dois parâmetros (coeficiente angular e intercepto), foi utilizado também o teste de Snedecor e Cochran (1989) para comparação entre parâmetros.

Uma vez ajustados e escolhidos os modelos, sua validação foi feita em área pertencente à parte de um talhão de produção comercial de grãos com 52 ha e declividade média de 5 %, localizada na Fazenda Sementes Primavera, situada próximo a Planaltina, DF (latitude: 15° 38' 16" S; longitude: 47° 26' 52" O; e altitude: 949 m), a aproximadamente 40 km de distância da Embrapa Cerrados (Fig. 3B). Essa área foi escolhida pelo fato de ser composta por Latossolos com textura variando de média a muito argilosa. O local, originalmente sob vegetação de Cerrado, foi desmatado em meados da década de 1970 para implantação de pastagem cultivada (*Andropogon gayanus*). Em 1988, a área passou a ser cultivada com culturas anuais em sistema convencional (grade pesada). Na safra 1995/1996, foi iniciado o sistema de semeadura direta envolvendo soja e milho (três anos com soja e um ano com milho). Em grade amostral de 125 m x 125 m, totalizando 31 pontos (Fig. 3C), foram feitas, no dia 28 de outubro de 2007, medições com os dois aparelhos e coleta de solos com anéis volumétricos, conforme descrito no processo de calibração.

Os valores de θ estimados na área de validação pelos aparelhos com base nos modelos ajustados foram confrontados com os valores de θ determinados em laboratório. A distribuição dos resíduos, expressa em $\Delta\theta$ (θ determinado em laboratório – θ estimado pelo aparelho com base nos modelos), foi avaliada graficamente. Os valores de θ estimados pelos modelos ajustados e os respectivos valores de $\Delta\theta$ foram correlacionados linearmente pelo método de Pearson com os teores de areia, argila e θ determinados em laboratório nos 31 pontos amostrados. Visando à caracterização espacial das variáveis analisadas, os mapas foram interpolados pelo inverso da distância para voltagem (V), e θ

determinado em laboratório e estimado pelos modelos, utilizando-se o aplicativo ArcView GIS 3.2, conforme procedimentos descritos em Shiratsuchi et al. (2005). A comparação entre mapas (superfícies interpoladas) foi feita com base em correlação linear de Pearson dos valores interpolados obtidos em pontos correspondentes a uma grade de 20 m x 20 m, conforme descrito em Sá et al. (2007). Para análises de correlação, foi utilizado o aplicativo SAEG versão 5.0.

Resultados e Discussão

Considerações sobre os solos utilizados para calibração

De acordo com Adámoli et al. (1986), os Latossolos correspondem a 46 % da área do Bioma Cerrado, enquanto os Neossolos Quartzarênicos correspondem a 15,2 %. Nos Latossolos, a textura pode variar desde média – entre 160 g kg⁻¹ e 350 g kg⁻¹ de argila – até muito argilosa – mais de 600 g kg⁻¹. Nos Neossolos Quartzarênicos, a textura é, por definição, arenosa (< 160 g kg⁻¹ de argila) (SANTOS et al., 2006). Considerando-se a abrangência dessas classes de solo e a variação nos teores de argila existentes nos solos utilizados para calibração do aparelho no presente estudo (Tabela 1), pode-se afirmar que a calibração foi feita em condições representativas dos solos do Bioma Cerrado.

Com relação aos atributos físico-hídricos (Tabela 1), embora sejam observadas densidades relativamente elevadas, sobretudo nos solos RQ e LVAm, esses valores são influenciados principalmente pelos teores mais elevados de areia, que tendem a proporcionar densidades mais elevadas (SÁ; SANTOS JÚNIOR, 2005). Entretanto, com base nos valores de macroporos relativamente mais baixos em relação aos microporos, é possível afirmar que os solos apresentam um grau de compactação relativamente elevado, notadamente no solo LVAa, o que influencia no formato das curvas de retenção de água (Fig. 4). Isso também afeta atributos como água disponível ou prontamente disponível. Considerando que as áreas são manejadas com pastagens, as quais se encontram em processo de degradação, o manejo inadequado pode ser considerado como a principal causa dessa compactação, conforme relatado por Leão et al. (2004).

Variações no teor de água e voltagem durante a calibração

A variação na voltagem correspondente ao valor em (V) em cada solo, ao longo dos dias em que foi feita a calibração, pode ser observada na Fig. 5A. Nota-se uma tendência de aumento ao longo do tempo, que foi semelhante para os três solos avaliados. Entretanto, as voltagens observadas para o solo LVAa foram substancialmente menores do que as observadas para os solos RQ e LVAm. A variação da voltagem foi proporcionalmente inversa à variação dos teores de θ , os quais diminuíram ao longo do tempo, e de maneira mais acentuada para os solos RQ e LVAm, indicando um comportamento diferenciado dos solos, o que pode ser atribuído basicamente às diferenças texturais, conforme relatado por Resende et al. (2002).

Efeito do tempo na estimativa do teor de água do solo

Os coeficientes dos modelos ajustados para estimativa do teor volumétrico de água a partir da voltagem e do tempo de leitura podem ser observados na Tabela 2. Foi ajustado um modelo para cada solo (RQ, LVAm e LVAa, modelos 1, 2 e 3, respectivamente). Embora os valores de R^2 tenham sido elevados ($P < 0,0001$), variando de 0,7567 no solo LVAa até 0,9581 no solo LVAm, apenas os coeficientes b , associados ao parâmetro voltagem, foram significativos ($P < 0,0001$) para os três solos, indicando que não houve influência do parâmetro tempo na estimativa de θ . Esse resultado pode ser visualizado na Fig. 6, nas superfícies de resposta obtidas pelos três modelos que são paralelas ao eixo do tempo, apresentando substancial inclinação no sentido do eixo da voltagem, razão pela qual os coeficientes b são significativos. Embora apresentem a mesma escala, os gráficos de superfície foram construídos respeitando-se a amplitude dos valores de θ observados em cada solo, permitindo perceber as diferenças intrínsecas a cada classe textural.

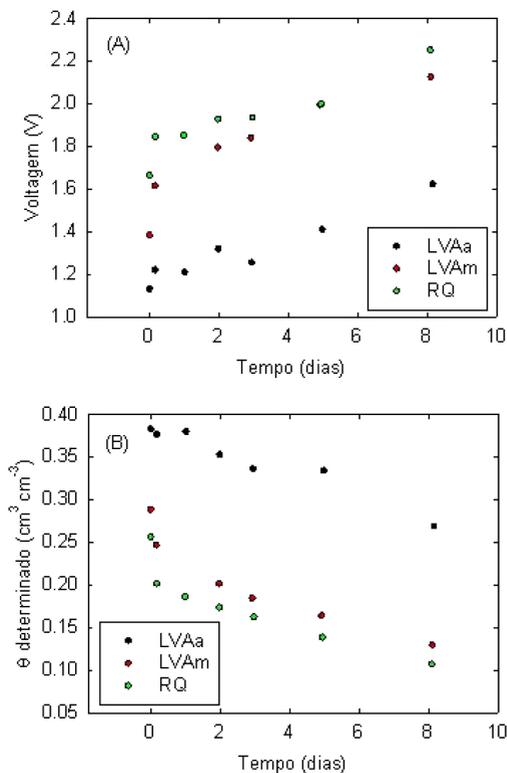


Fig. 5. Variação ao longo dos dias de realização dos ensaios de calibração da voltagem (A) e do teor de água volumétrico do solo (B).

Tabela 2. Parâmetros dos modelos ajustados para estimativa do conteúdo volumétrico de água a partir do tempo de leitura e da voltagem para os três solos estudados.

Parâmetros	Solo					
	RQ		LVAm		LVAa	
	Coefficiente	Probab.	Coefficiente	Probab.	Coefficiente	Probab.
θ (cm^3/cm^3) = a + b (V) + c (min)						
	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
a - Constante	$7,19318 \times 10^{-1}$	-	$6,25751 \times 10^{-1}$	-	$6,17524 \times 10^{-1}$	-
b - Voltagem (V)	$-2,84329 \times 10^{-1}$	0,0001	$-2,38232 \times 10^{-1}$	0,0001	$-2,05332 \times 10^{-1}$	0,0001
c - Tempo (min)	$-3,00476 \times 10^{-4}$	0,1819	$-1,23114 \times 10^{-4}$	0,3002	$-3,43089 \times 10^{-5}$	0,4381

Continua...

Tabela 2. Continuação.

Parâmetros	Solo					
	RQ		LVAm		LVAA	
	Coefficiente	Probab.	Coefficiente	Probab.	Coefficiente	Probab.
R ²	0,8986	<0,0001	0,9581	<0,0001	0,7567	<0,0001
N	222		198		206	
θ (cm ³ cm ⁻³) = a + b (V)						
	Modelo 4		Modelo 5		Modelo 6	
a - Constante	6,87366x10 ⁻¹	-	6,17495x10 ⁻¹	-	6,40135x10 ⁻¹	-
b - Voltagem (V)	-2,68324x10 ⁻¹	<0,0001	-2,33441x10 ⁻¹	<0,0001	-2,24301x10 ⁻¹	0,0001
R ²	0,8764	<0,0001	0,9516	<0,0001	0,8605	<0,0001
N	16		13		14	

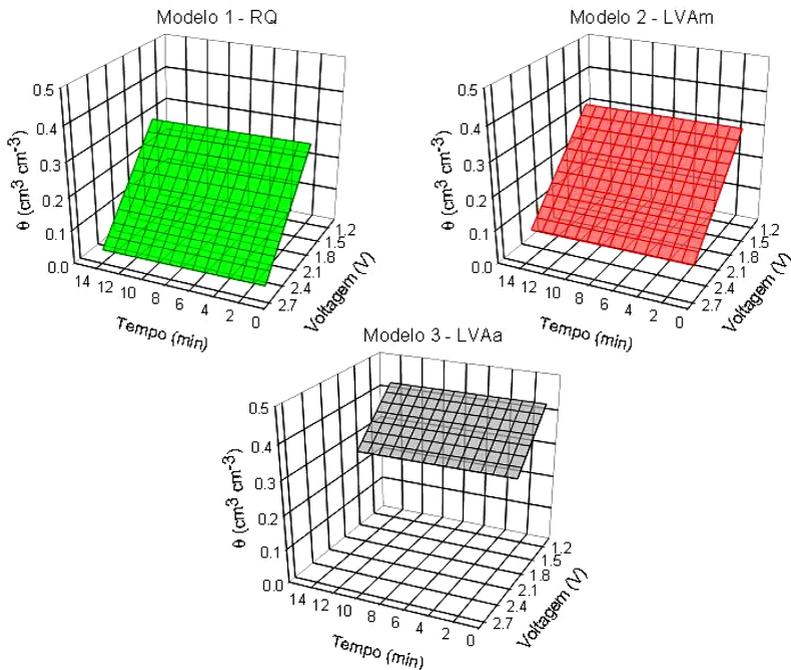


Fig. 6. Superfícies de resposta linear obtidas pelos valores de conteúdo de água volumétrico (θ) estimado em função da voltagem (V) e do tempo (min) pelos modelos 1, 2 e 3 para os três solos utilizados na calibração do equipamento.

Estimativa do teor de água do solo a partir da voltagem e da textura

Com o parâmetro tempo excluído, foram ajustados os modelos lineares 4, 5 e 6 para estimativa de θ em função da voltagem medida para cada

solo (Tabela 2). A retirada do parâmetro tempo possibilitou aumento no valor de R^2 para o solo LVAa, enquanto, para os demais solos, eles não sofreram alteração, sendo os coeficientes angulares (b) significativos em todos os casos ($P < 0,0001$). O comportamento das linhas de tendência proporcionadas pelos modelos 4, 5 e 6 pode ser observado na Fig. 7A, onde se constata visualmente uma ligeira diferença na inclinação das retas. Essa diferença é confirmada pelo teste de Snedecor e Cochran (1989) (Tabela 3), em que se pode observar que todos os coeficientes angulares são diferentes. Com relação aos coeficientes lineares, eles são iguais apenas para os modelos 4 e 6. Esse comportamento parece ser influenciado pela diferença textural entre os solos.

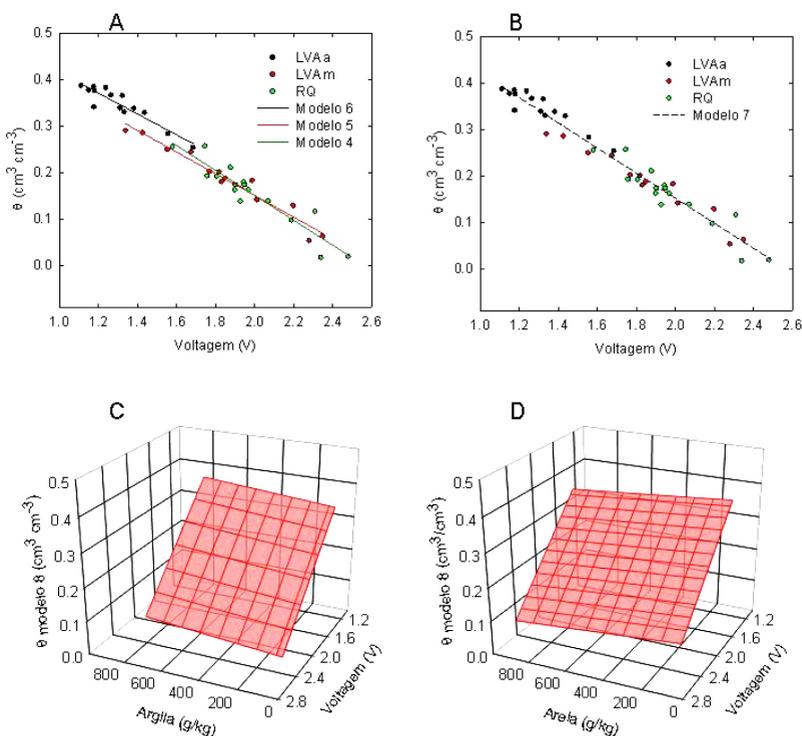


Fig. 7. Estimativa do conteúdo de água volumétrico (θ) a partir da voltagem (V) pelos modelos 4, 5 e 6 para cada solo isoladamente (A) e pelo modelo 7, considerando os dados agrupados dos três solos (B); superfície de resposta obtida pelo modelo 8 para estimativa de θ em função da voltagem e do teor de argila (C); e pelo modelo 9, para estimativa de θ em função da voltagem e do teor de areia do solo (D).

A comparação entre esses modelos, feita de acordo com Motulski e Christopoulos (2003), permite afirmar que os modelos 4 e 5 são iguais, ambos diferindo do modelo 6 (Tabela 3). Isso pode ser atribuído ao fato de que o conjunto de dados de V e θ observados nos solos RQ e LVAm apresentam amplitudes de variação semelhantes, enquanto os dados de V e θ observados para o solo LVAa parecem ser um prolongamento dos dados dos dois solos (Fig. 7A). Quanto aos desvios ($\Delta\theta$) (Fig. 8A), os modelos 4 e 5 apresentaram valores mais elevados - em torno de $\pm 0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ - quando comparados ao modelo 6, cuja amplitude para a maioria dos dados ficou ao redor de $\pm 0,02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Tabela 3. Valores de F e probabilidades de significância utilizados para comparações entre os modelos 4, 5 e 6 e respectivos coeficientes angulares e lineares.

Textura	Textura	
	Modelo 5	Modelo 6
Comparação entre equações ⁽¹⁾		
Modelo 4	0,58 (P<0,5639)	24,51 (P<0,0001)
Modelo 6	23,18 (P<0,0001)	-
Comparação entre coeficientes angulares ⁽²⁾		
Modelo 4	16,82 (P<0,000381)	47,91 (P<0,000001)
Modelo 6	4,05 (P<0,056017)	-
Comparação entre coeficientes lineares ⁽²⁾		
Modelo 4	0,09 (P<0,762371)	22,46 (P<0,000061)
Modelo 6	33,33 (P<0,000006)	-

¹ Motulsky e Christopoulos (2003).

² Snedecor e Cochran (1989).

Esse comportamento diferenciado entre solos está de acordo com o relato de Seyfried e Murdock (2004), que inclusive propuseram calibrações específicas para cada tipo de solo. De acordo com Seyfried et al. (2005), as perdas dielétricas podem ser afetadas pelas propriedades da fração argila, como superfície específica e capacidade de troca catiônica (CTC), as quais podem variar em função de diferentes tipos de argila. No caso específico dos solos utilizados para calibração, o estudo feito por Macedo e Bryant (1987) no mesmo local demonstrou

que a mineralogia da fração argila desses solos é composta basicamente por caolinita, gibbsita e óxidos de ferro (goethita e hematita); mineralogia essa típica da grande maioria dos solos tropicais, sobretudo no Cerrado (RESENDE et al., 2002). Dessa forma, espera-se que as diferenças existentes entre os três solos estudados sejam mais devidas à textura do que à mineralogia.

Assim, foram ajustados os modelos 7, 8 e 9, sendo o primeiro para estimativa de θ em função de V , e os outros para estimativa de θ em função da V e argila e V e areia, respectivamente, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 4, onde pode-se constatar que todos apresentaram valores de R^2 elevados e significativos ($P < 0,0001$), porém bastante próximos. Da mesma forma, todos os coeficientes dos três modelos foram significativos. As comparações entre esses três modelos, feitas conforme Motulski e Christopoulos (2003), permitem afirmar que eles são estatisticamente iguais (Tabela 4). Dessa forma, embora os coeficientes ajustados para argila e areia nos modelos 8 e 9, respectivamente, tenham sido significativos, seu efeito na estimativa de θ é menor do que o efeito da voltagem, porém não pode ser desprezado. Isso pode ser visualizado nas Fig. 7C e 7D, em que se observa inclinação das superfícies de resposta mais acentuadas em função da voltagem do que em função dos teores de argila e areia, reflexo dos valores baixos dos coeficientes ajustados para estes últimos atributos.

Quanto aos desvios, os modelos 7, 8 e 9 apresentaram comportamento semelhante (Fig. 8B), com valores de $\Delta\theta$, em sua maioria (mais precisamente, 93,1 % do erro das estimativas), situados entre $\pm 0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, ou seja, semelhante aos modelos 4 e 5. O modelo 7 apresentou 62,8 % dos desvios entre $\pm 0,02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, enquanto os modelos 8 e 9 praticamente se sobrepuseram – pontos vermelhos e verdes – com 74,4 % dos desvios entre $\pm 0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, confirmando que os dois modelos são similares.

Tabela 4. Parâmetros dos modelos ajustados para estimativa do conteúdo volumétrico de água a partir da voltagem, dos teores de argila e areia, considerando dados dos três solos utilizados para calibração e valores de F e respectivas probabilidades, utilizados para comparação entre os modelos ajustados.

Modelos	Parâmetros	
	Coefficiente	Probabilidade
Modelo 7: θ (cm ³ cm ⁻³) = a + (b*Voltagem)		
a - Constante	6,92744x10 ⁻¹	-
b - Voltagem (V)	2,70413x10 ⁻¹	0,0001
R ²	0,9598	<0,0001
N	43	
Modelo 8: θ (cm ³ cm ⁻³) = a + (b*Voltagem) + (d*Argila)		
a - Constante	6,33655x10 ⁻¹	-
b - Voltagem (V)	-2,44404x10 ⁻¹	0,0001
d - Argila (g kg ⁻¹)	4,41800x10 ⁻⁵	0,0072
R ²	0,9655	<0,0001
N	43	
Modelo 9: θ (cm ³ cm ⁻³) = a + (b*Voltagem) + (e*Areia)		
a - Constante	6,76636x10 ⁻¹	-
b - Voltagem (V)	-2,44502x10 ⁻¹	0,0001
e - Areia (g kg ⁻¹)	-4,43100x10 ⁻⁵	0,0072
R ²	0,9655	<0,0001
N	43	
Comparação entre equações ⁽¹⁾		
	Modelo 8	Modelo 9
Modelo 7	4,3x10 ⁻⁶ (P<0,998)	6x10 ⁻⁷ (P<0,999)
Modelo 9	4,3x10 ⁻⁶ (P<0,998)	

¹ Motulsky e Christopoulos, (2003)

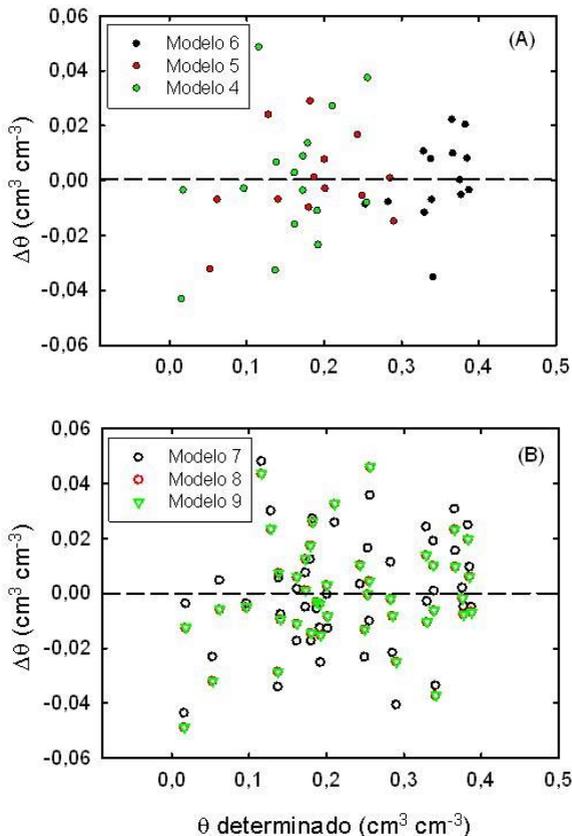


Fig. 8. Análise de resíduos ($\Delta\theta$) dos dados obtidos nos solos RQ, LVAm e LVAA da Embrapa Cerrados para os modelos 4, 5 e 6 (A) e para os modelos 7, 8 e 9 (B), onde a linha pontilhada representa a reta 1:1.

Validação dos modelos

Determinados os teores de θ e a voltagem na camada de 0 m a 0,05 m de cada um dos 31 pontos da área utilizada para validação (Fig. 3B e 3C), foi estimado o teor de água volumétrico para cada ponto a partir dos modelos 7, 8 e 9. As relações entre os valores determinados e estimados são apresentadas na Fig. 9A, e os respectivos desvios na Fig. 9B. Embora a relação entre θ estimado e determinado pelo modelo 8 esteja mais próxima da linha 1:1 – o que é desejável, a dispersão

dos dados foi semelhante para os três modelos, conforme pode ser observado na distribuição dos valores de $\Delta\theta$ (Fig. 9B), onde se constata que os erros de estimativa, em todos os casos, situaram-se entre $\pm 0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Entretanto, dos 31 valores de θ estimados apenas pela voltagem (modelo 7), oito apresentaram erros superiores a $\pm 0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, ou seja, 74,2 % das estimativas apresentaram um erro entre $\pm 0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, enquanto, para as estimativas a partir de voltagem e textura (modelos 8 e 9), apenas três dos 31 pontos apresentaram erro superior a $\pm 0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, ou seja, 90,4 % das estimativas apresentam erro entre $\pm 0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Para o modelo 7, cerca de 35 % das estimativas (11 pontos) situaram-se entre $\pm 0,02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, contra 45 % (14 pontos) para os modelos 8 e 9. Mesmo que essas porcentagens tenham sido menores do que as observadas para os solos utilizados no ajuste dos modelos (Fig. 8B), isso indica que a inclusão de parâmetros texturais na estimativa de θ melhora a sensibilidade dos modelos e está de acordo com o que foi relatado por Seyfried et al. (2005): desvios na calibração de equipamentos de TDR a partir da equação proposta por Topp et al. (1980) podem ser atribuídos à textura do solo.

Visando compreender melhor a relação entre as variáveis e a distribuição desses erros, foram estabelecidas correlações entre os valores de θ determinado e estimado pelos modelos 7, 8 e 9 bem como dos respectivos valores de $\Delta\theta$ com valores determinados de areias, argila e θ (Tabela 5). Constatou-se que θ determinado pelo método padrão apresentou altas correlações com os teores de areia e argila, sendo inversa no primeiro caso e direta no segundo. Os valores de θ estimados a partir dos modelos 8 e 9 apresentaram coeficientes de correlação mais elevados com os valores de θ determinado do que os valores estimados a partir do modelo 7. Os valores de $\Delta\theta$ do modelo 7 apresentaram correlações mais elevadas com os valores de areia e argila do que os modelos 8 e 9, o que ressalta a importância da inclusão de parâmetros texturais na estimativa de θ a partir do equipamento avaliado. Entretanto, outros fatores não avaliados no presente estudo como CTC, pH, saturação por bases podem também afetar a distribuição de $\Delta\theta$, concordando com Seyfried et al. (2005), uma vez que a área utilizada para validação estava cultivada com culturas anuais recebendo

adubações regulares, ao contrário da área utilizada para calibração e geração dos modelos, que não recebeu fertilizantes. Esse fato poderia ser objeto de estudos futuros.

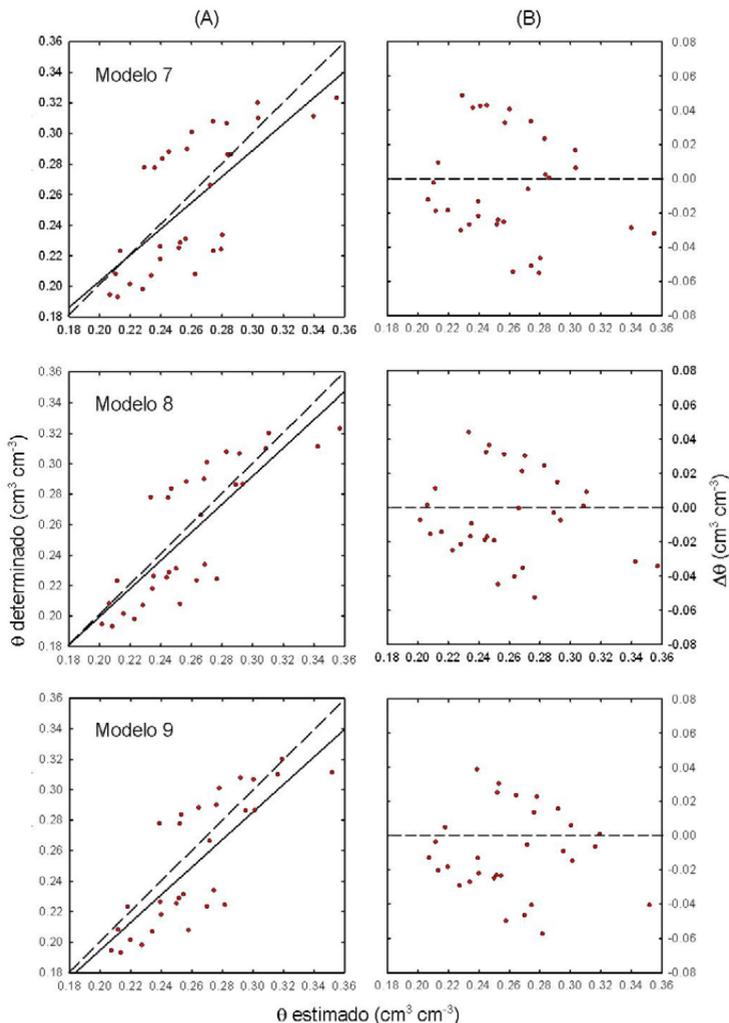


Fig. 9. Relações obtidas na área de validação dos modelos (Fazenda Sementes Primavera) entre θ determinado em laboratório e θ estimado pelos modelos 7, 8 e 9 – linha cheia - comparada com a reta 1:1 – linha tracejada (A) e respectiva distribuição de resíduos ou $\Delta\theta$, definido como a diferença entre θ determinado e θ estimado, onde a linha pontilhada representa a reta 1:1 (B).

Observando-se os mapas da área (Fig. 10), nota-se que os valores de V medidos apresentaram uma distribuição espacial semelhante aos teores de argila e de θ determinado, sendo os mapas gerados a partir dos teores de θ estimados pelos três modelos bastante semelhantes entre si. Essas tendências podem ser melhor compreendidas avaliando-se os coeficientes de correlação de Pearson obtidos entre os dados interpolados (Tabela 5), onde se constata que a superfície do mapa de θ determinado apresenta uma correlação de 0,98 com o mapa de argila. O mapa interpolado a partir dos valores de θ estimados pelo modelo 7 apresentou correlação de 0,77 com o mapa de argila, ficando os mapas interpolados a partir dos valores de θ estimados pelos modelos 8 e 9 em posição intermediária – respectivamente, 0,86 e 0,87. Entretanto, esses apresentaram coeficientes de correlação com o mapa de θ determinado ligeiramente superiores ao mapa estimado pelo modelo 7, confirmando que a inclusão de variáveis texturais (areia ou argila) funcionam como um “ajuste fino”, melhorando a estimativa indireta do teor de água volumétrico do solo a partir da voltagem fornecida pelo equipamento estudado.

Tabela 5. Coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis determinadas nos pontos amostrados e entre os valores das variáveis obtidas a partir dos dados interpolados nos mapas numa grade de 20 m x 20 m da área utilizada para validação dos modelos.

Variável	areias	Argila	θ determinado
	Dados obtidos nos pontos amostrados		
θ determinado	-0,95	0,94	-
θ modelo 7	-0,63	0,59	0,70
θ modelo 8	-0,76	0,73	0,81
θ modelo 9	-0,77	0,74	0,82
$\Delta\theta$ modelo 7	-0,60	0,63	0,59
$\Delta\theta$ modelo 8	-0,48	0,51	0,49
$\Delta\theta$ modelo 9	-0,44	0,47	0,44
Dados interpolados			
θ determinado	-	0,98	-
θ modelo 7	-	0,77	0,82
θ modelo 8	-	0,86	0,90
θ modelo 9	-	0,87	0,90

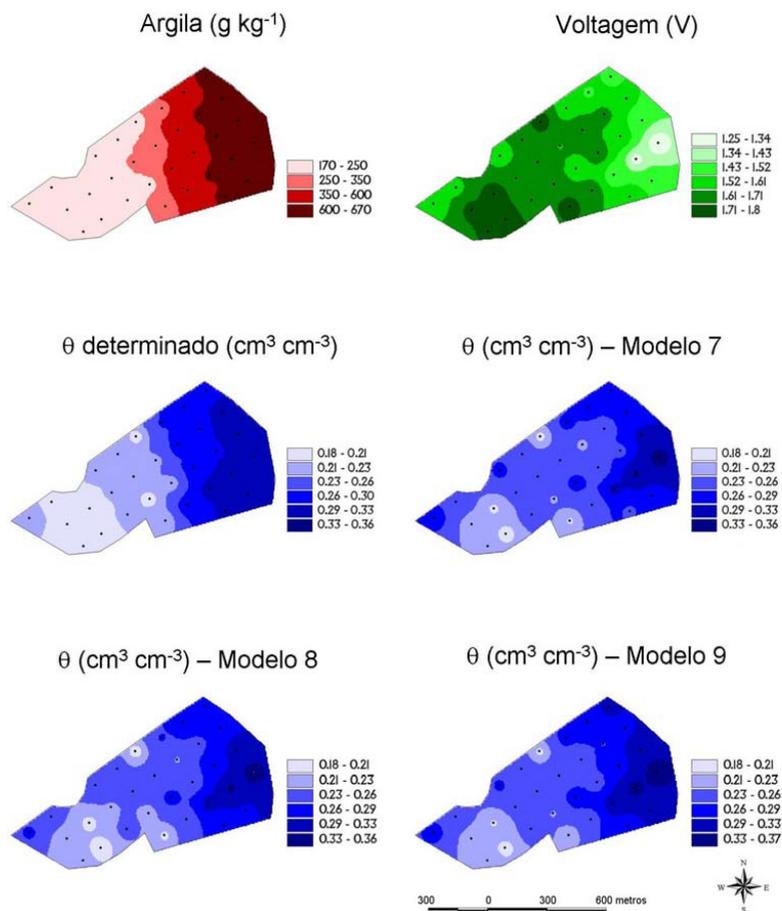


Fig. 10. Mapas da área utilizada para validação dos modelos, representando as variações dos teores de argila do solo na camada 0 cm a 20 cm, da voltagem (V) e de θ determinado e estimado ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) pelos modelos 7, 8 e 9 na camada de 0 m a 0,05 m.

Conclusões

O teor de água volumétrico do solo pode ser estimado a partir da voltagem fornecida pelo equipamento, com um erro de até $\pm 0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

A inclusão da textura nos modelos melhora a estimativa do teor volumétrico de água do solo.

Agradecimentos

Ao técnico agrícola Carlos Alberto Cardoso e ao auxiliar de operações Jesuino de Sousa Caldas, pelo auxílio nos trabalhos de campo na Embrapa Cerrados e à Fazenda Sementes Primavera (DF), especialmente, ao Engenheiro Agrônomo Francisco Luçardo pelo apoio logístico dado à equipe durante a realização dos trabalhos de validação.

Referências

- ADÂMOLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, L. G. de; MADEIRA NETTO, J. Caracterização da região dos cerrados. In: GOEDERT, W. (Ed.). **Solos dos cerrados: tecnologia e estratégia de manejo**. [Planaltina, DF]: Embrapa-CPAC; São Paulo: Nobel, 1986. p. 33-74.
- ANDRADE, C. L. T.; BORGES JÚNIOR, J. C. F.; COUTO, L. Características físico-hídricas e dinâmica da água no solo. In: ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo de irrigação**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 528 p.
- CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997. 212 p. (Embrapa-CNPS. Documentos, 1).
- DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 201-214, 2004.
- FREITAS JÚNIOR, E. de; SILVA, E. M. da. Uso da centrífuga para determinação da curva de retenção de água no solo, em uma única operação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 11, p. 1423-1428, 1984.
- LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 28, p. 415-423, 2004.
- LEMONS, R. C. de; SANTOS, R. D. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3. ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1996. 83 p.

MACEDO, J.; BRYANT, J. Morphology, mineralogy, and genesis of a hydrosequence of Oxisols in Brazil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 51, n. 3, p. 690-698, 1987.

MOTULSKY, H. J.; CHRISTOPOULOS, A. **Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression: a practical guide to curve fitting**. San Diego: GraphPad Software, 2003. Disponível em: <<http://www.graphpad.com>>. Acesso em: 23 nov. 2006.

NADLER, A.; LAPID, Y. An improved capacitance sensor for in situ monitoring of soil moisture. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 34, p. 361-368, 1996.

PACHECO, A. A. R. C.; DIAS JÚNIOR, M. S. Estudo comparativo de métodos de campo e laboratório aplicados à confecção de blocos em adobe. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 14, n. 2, p. 176-190, 1990.

RESCK, D. V. S.; SILVA, J. E. da. Soil organic matter dynamics under different tillage systems in the Cerrados region in Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 14., 1990, Kyoto. **Transactions...** Kyoto: International Society of Soil Science, 1990. v. 6, p. 325-326.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 4. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2002. 338 p.

ROBINSON, M.; DEAN, T. J. Measurement of near surface soil water content using a capacitance probe. **Hydrological Processes**, v. 7, p. 77-86, 1993.

SÁ, M. A. C. de; SANTOS JÚNIOR, J. D. G. dos. **Compactação do solo: conseqüências para o crescimento vegetal**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005. 25 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 136).

SÁ, M. A. C. de; SHIRATSUCHI, L. S.; FRANZ, C. A. B.; SANTOS JÚNIOR, J. D. G. dos. **Compactação do solo e produtividade da cultura da soja em área irrigada no Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. 31 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 177).

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; OLIVEIRA, J. B. de; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

SEYFRIED, M. S.; MURDOCK, M. D. Measurement of soil water content with a 50-MHz soil dielectric sensor. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 394-403, 2004.

SEYFRIED, M. S.; GRANT, L. E.; DU, E.; HUMES, K. Dielectric loss and calibration of the Hydra Probe soil water sensor. **Vadose Zone Journal**, v. 4, p. 1070-1079, 2005.

SHIRATSUCHI, L. S.; SANO, E. E.; BEZERRA, H. S. **Manual de utilização das principais funções do programa computacional ArcView 3.2 no apoio à agricultura de precisão**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005. 47 p. (Embrapa Cerrados. Documentos 138).

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8. ed. Ames: Iowa State University, 1989.

TOPP, G. C.; YANUKA, M.; ZEBCHUK, W. D.; ZEGELIM, S. Determination of electrical conductivity using a time domain reflectometry: soil and water experiments in coaxial lines. **Water Resources Research**, Washington, v. 24, p. 945-952, 1980.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.