

CALIBRAÇÃO DE UM SENSOR CAPACITIVO PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE EM TRÊS CLASSES DE SOLOS

SAMUEL COLA PIZETTA¹; ROGÉRIO RANGEL RODRIGUES²; GERALDO MAGELA PEREIRA³; FABIÁN ENRIQUE DÍAZ PACHECO⁴; MARCELO RIBEIRO VIOLA⁵ E LUIZ ANTÔNIO LIMA⁶

¹*Doutorando em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas pela Universidade Federal de Lavras (UFLA)- Campus Universitário, Departamento de Engenharia, C.P. 3037- CEP 37200-000, Lavras-MG, Brasil. scpizetta@hotmail.com;*

²*Doutor em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas pela Universidade Federal de Lavras (UFLA)- Campus Universitário, Departamento de Engenharia, C.P. 3037- CEP 37200-000, Lavras-MG, Brasil., técnico no IFMA, Campus Santarém, Brasil. rogeriorr7@hotmail.com;*

³*Professor Titular da Universidade Federal de Lavras (UFLA) - Campus Universitário, Departamento de Engenharia, C.P. 3037- CEP 37200-000, Lavras-MG, Brasil. geraldop@deg.ufla.br;*

⁴*Engenheiro Agrícola pela Universidad de Sucre (Unisucre)- Calle 25 # 39-61, Las Margaritas, Sincelejo-Sucre. Colômbia. fabian_18@hotmail.com;*

⁵*Professor Adjunto da Universidade Federal de Lavras (UFLA) – Campus Universitário, Departamento de Engenharia, C.P. 3037- CEP 37200-000, Lavras-MG, Brasil.. marcelo.viola@deg.ufla.br;*

⁶*Professor Associado da Universidade Federal de Lavras (UFLA) - Campus Universitário, Departamento de Engenharia, C.P. 3037- CEP 37200-000, Lavras-MG, Brasil.. lalima@deg.ufla.br*

1 RESUMO

Um dos maiores desafios de domínio agrícola atualmente é a mensuração prática, rápida e precisa do teor de água no solo. Dessa forma, o conhecimento acerca dos equipamentos que estimem essa umidade é de fundamental importância. Nesse contexto, objetivou-se com este estudo, efetuar a calibração dos sensores de capacitância Eletrodex por meio do método padrão de estufa em três classes de solo, sendo o Argissolo, Latossolo e Nitossolo. Os solos foram coletados no Campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA) e o experimento foi realizado no Laboratório de Hidráulica, no município de Lavras, estado de Minas Gerais. Para a calibração foram utilizados sete níveis de umidade que compreenderam diferentes valores de porcentagens da disponibilidade total de água no solo (DTA). Os resultados demonstraram que a utilização desse sensor não permitiu estimar, de forma satisfatória, a umidade volumétrica do solo, nos intervalos de umidade testados, em nenhum dos solos submetidos à calibração, uma vez que não foi possível obter equações que apresentassem coeficientes de determinação adequados.

Palavras-chave: instrumentação, constante dielétrica, teor de água, sensor FDR.

PIZETTA, S. C.; RODRIGUES, R. R.; PEREIRA, G. M. PACHECO, F. E. D; VIOLA, M. R.; LIMA, L. A.
CALIBRATION OF A CAPACITANCE SENSOR FOR MOISTURE ESTIMATION IN THREE SOIL CLASSES

2 ABSTRACT

One of the largest agricultural challenges has been the practical, quick and precise measurement of water content at soils, thus requiring satisfactory equipment to perform such task. This research investigated capacitive soil moisture sensors defined by the manufacturer as Eletrodex, comparing its measurements to dry oven techniques for soil moisture determination at three soil classes: Argisol, Oxisol, and Nitosol. Soils were collected at the Campus of the Federal University of Lavras (UFLA), and the experiment was carried out at the Hydraulics Laboratory in Lavras, state of Minas Gerais. For calibration, seven moisture levels were used, which comprised different percentages of total available moisture (TAM). Results lead to the conclusion that the sensor does not satisfactorily estimate the volumetric water content for any soil class tested. Such conclusion is based on the fact that no adequate coefficients of determination could be obtained at calibration curves.

Keywords: instrumentation, dielectric constant, content of water, FDR sensor.

3 INTRODUÇÃO

De acordo com Kinzli, Mana e Oad (2012) a agricultura é o setor que mais demanda água no mundo, cerca de 80%, e devido ao aumento crescente da demanda por esse recurso para produção de alimentos e biocombustíveis (GENSLER; OAD; KINZLI, 2009; ROSEGRANT; RINGLER; ZHU, 2009), a agricultura irrigada precisa aprimorar os métodos de gestão da água (COOLEY; CHRISTIAN-SMITH; GLEICK, 2009), ainda mais frente ao cenário de mudanças climáticas.

O conhecimento e monitoramento do conteúdo de água no solo são de fundamental importância para o manejo da irrigação uma vez que o crescimento e o desenvolvimento adequado das plantas dependem de forma muito significativa do teor de água no solo (KITIĆ; CRNOJEVIĆ-BENGIN, 2013), sendo tal informação fundamental para o manejo racional da água e recursos energéticos.

A medição do teor de água no solo por meio de sensores de capacitância estão em crescente utilização, devido aos seguintes fatores: não são métodos destrutivos, fornecem medições quase instantâneas, podem permanecer no solo durante um longo período, são capazes de fornecer leituras contínuas e não utilizam radiação, o que permite medições precisas próximo à superfície do solo (SOUZA et al., 2016; GARDNER et al., 1991).

O método da capacitância baseia-se na constante dielétrica (K), que é um índice que expressa a permissividade do meio em relação a permissividade do vácuo (ϵ_0). Portanto, $K = \epsilon / \epsilon_0$. Assim, para o vácuo, $K = 1$ (SILVA et al., 2007).

Para o ar, K é praticamente 1, para um solo seco, varia de 2 a 5, enquanto para água (20 °C) seu valor é cerca de 81. No solo, o valor de K medido no sistema solo-água-planta é denominada de constante dielétrica aparente (K_a). Portanto, dado a diferença considerável entre o valor de K_a com a presença de água no sistema, com a determinação desse índice é possível estimar a umidade volumétrica do solo de forma indireta (SOUZA et al., 2006).

As desvantagens na utilização das sondas dielétricas consiste na necessidade de calibração para garantir medições precisas do teor de água no solo; sensibilidade ao tipo de solo e outros fatores, como a salinidade e a temperatura (INOUE et al., 2008; KIZITO et al., 2008).

Nesse contexto, torna-se importante avaliar o desempenho dos sensores e efetuar sua calibração, em especial para os sensores de menor custo, para que os mesmos possam se tornar uma opção viável para os irrigantes.

Sendo assim, objetivou-se com este estudo realizar a calibração do sensor de capacitância Eletrodex por meio do método padrão de estufa em três classes distintas de solo, sendo o Argissolo Vermelho distrófico, o Latossolo Vermelho distroférico e o Nitossolo Vermelho eutrófico.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Relação-Solo-Água-Planta, Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA), no município de Lavras, que está situado na região sul do estado de Minas Gerais.

Foram utilizados no experimento três diferentes classes de solos: Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico e Nitossolo Vermelho eutrófico (Embrapa, 2013).

As três classes de solo foram escolhidas por serem representativas da região de Lavras e apresentam características potenciais à prática da irrigação. Os mesmos foram coletados no Campus da Universidade Federal de Lavras a uma profundidade de 0 a 30 cm e peneirados em malha de 2 mm e secos à sombra em camada fina.

As análises físicas, físico-hídricas e condutividade elétrica (Tabela 1) foram realizadas de acordo com a metodologia proposta pela Embrapa (1997).

Tabela 1. Atributos físico-hídricos referentes ao Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico e Nitossolo Vermelho eutrófico

Classes de solos	Análise granulométrica			Ds ⁽¹⁾ g cm ⁻³	MO ⁽²⁾ dag kg ⁻¹	CC ⁽³⁾ -----g g ⁻¹ -----	PMP ⁽⁴⁾	CE ⁽⁵⁾ dS m ⁻¹
	Areia	Silte	Argila					
	----- % -----							
Argissolo	52	12	36	1,26	2,48	0,242	0,146	0,07
Latossolo	10	29	61	1,09	2,23	0,367	0,250	0,11
Nitossolo	34	13	53	1,27	2,87	0,308	0,185	0,07

⁽¹⁾Ds = massa específica do solo; ⁽²⁾MO = matéria orgânica do solo; ⁽³⁾CC = umidade no solo na capacidade de campo (tensão de 10 kPa); ⁽⁴⁾PMP = umidade no solo no ponto de murcha permanente (tensão de 1500 kPa); ⁽⁵⁾ = condutividade elétrica.

O sensor capacitivo-FDR, empregado para estimar a umidade do solo utilizado no experimento foi o Eletrodex, adquirido no comércio de instrumentos eletrônicos do estado de Minas Gerais e calibrado para três classes de solo (Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico e Nitossolo Vermelho eutrófico).

Cada unidade experimental foi constituída de um vaso plástico (altura de 21,5 cm, diâmetro inferior de 20 cm e diâmetro superior de 27 cm) preenchido com 10 L de cada um dos diferentes solos, sendo constituído de três repetições. Foram utilizadas no experimento sete níveis umidade para os três tipos de solo. Para tanto, os teores de água no solo ficaram compreendidos no intervalo de disponibilidade total de água para as plantas, ou seja, entre a umidade referente ao Ponto de Murcha Permanente (PMP) e a umidade do solo na Capacidade de Campo (CC), uma vez que o intuito do trabalho é a calibração do sensor para fins de

irrigação. A calibração do sensor foi realizada seguindo metodologia (modificada) descrita por Kinzli, Manana e Oad (2012) citado por Spelman, Kinzil e Kunberger (2013).

A disponibilidade total de água do solo foi calculada pela Equação 1:

$$DTA = U_{CC} - U_{PMP} \quad (1)$$

Em que:

DTA = disponibilidade total de água no solo (g g^{-1})

U_{CC} = umidade gravimétrica do solo (g g^{-1}) na capacidade de campo (10 kPa);

U_{PMP} = umidade gravimétrica do solo (g g^{-1}) no ponto de murcha permanente (1500 kPa).

Em seguida foram estabelecidos valores de porcentagens da disponibilidade total de água no solo (DTA), acarretando nos sete diferentes teores de água no solo, que foram: 0% da DTA, ou seja, a umidade referente ao Ponto de Murcha Permanente; 20%, 40%, 60%, 80% da DTA; 100% da DTA, ou seja, a umidade referente à Capacidade de Campo do solo; 120% da DTA, ou seja, 20% de umidade acima da capacidade de campo.

Para definir o teor de umidade do solo para cada faixa (porcentagem) de água disponível total descrita acima, utilizou-se a Equação 2:

$$U = (f \cdot DTA) + U_{PMP} - U_r \quad (2)$$

Em que:

U = umidade do solo referente a determinado teor de água (g g^{-1});

f = porcentagem de água disponível total (0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2);

U_{PMP} = umidade gravimétrica do solo (g g^{-1}) no ponto de murcha permanente (1500 kPa);

U_r = Umidade residual (g g^{-1}).

A umidade residual compreende a umidade inicial do solo, uma vez que o mesmo não se encontrava totalmente seco, sendo determinada pelo método Padrão de estufa.

No cálculo do volume de água necessário para umedecer o solo, nas diferentes faixas de umidade foi utilizada a Equação 3:

$$VA = U \cdot ms \quad (3)$$

Em que:

VA = volume de água (mL);

U = umidade do solo referente a determinado teor de água (g g^{-1});

Ms = massa de solo utilizada no teste (g).

Inicialmente foi determinada a massa do solo por meio de uma balança, e em seguida efetuou-se o cálculo do volume de água necessário para elevar a umidade de cada solo até o valor estipulado. Para isso foi subtraída a umidade inicial de cada solo (umidade residual). Posteriormente, o solo foi depositado sobre um recipiente plástico e por meio de uma proveta graduada foi adicionado o volume de água para que o mesmo atingisse a umidade referente ao Ponto de Murcha Permanente (conforme exposto na Equação 1 e 2). Em seguida, o solo e a água foram misturados manualmente por cerca de 20 minutos até a obtenção da homogeneidade da amostra.

Depois desse processo, o solo foi transferido para os três vasos (três repetições) e levemente compactado até o volume de 10L. Em seguida esses vasos foram depositados sobre

a bancada do laboratório e efetuaram-se as leituras de umidade empregando-se o sensor Eletrodex. Para a leitura de dados desse sensor foi utilizado a Plataforma Arduino Uno (leitura expressa em bytes), que consiste de uma placa de circuitos com um microcontrolador do fabricante Atmel.

O valor de umidade informado pelo leitor foi considerado quando houve estabilização da mesma, ou seja, quando houve constância do valor observado, e as mesmas foram tomadas a 15 cm de profundidade. Optou-se por essa profundidade por representar o sistema radicular efetivo das espécies olerícolas.

Posteriormente às leituras, efetuou-se a extração de amostras de solo para mensuração da umidade gravimétrica, que foi determinada pelo método padrão de estufa, de acordo com a recomendação proposta pela Embrapa (1997), como exposto na Equação 4:

$$U = \frac{\mu - m_s}{m_s} \quad (4)$$

Em que:

U = umidade do solo, em base peso ($g\ g^{-1}$);

μ = massa de solo úmido (g);

m_s = massa de solo seco (g).

As amostras de solos foram coletadas nas mesmas profundidades que se efetuaram as leituras dos sensores e ao redor das hastes dos sensores. Também foi determinada a massa específica do solo, pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997), de acordo com a Equação 5:

$$D_s = \frac{m_s}{v} \quad (5)$$

Em que:

D_s = massa específica do solo ($g\ cm^{-3}$);

m_s = massa de solo seco (g);

v = volume do anel (cm^3).

Para tal procedimento, efetivou-se a retirada de uma amostra de solo a 15 cm de profundidade e posteriormente foi seco em estufa.

Após a mensuração da umidade gravimétrica (Equação 4) e massa específica do solo (Equação 5) torna-se possível a determinação da umidade volumétrica conforme Equação 6:

$$\theta = D_s \cdot U \quad (6)$$

Em que:

θ = umidade volumétrica ($cm^3\ cm^{-3}$);

D_s = massa específica do solo ($g\ cm^{-3}$);

U = umidade gravimétrica ($g\ g^{-1}$).

Posteriormente a realização desse processo, o solo foi transferido dos vasos para o recipiente plástico e adicionado a este, o volume de água necessário para que fosse atingida 20% da água disponível total, em seguida efetuou-se a homogeneização desse solo e novamente tomaram-se as leituras e a retirada das amostras para determinação de umidade e massa específica do solo, conforme descrito anteriormente. Esse procedimento foi realizado, sucessivamente para as umidades de interesse até que o último teor de água fosse alcançado.

Para correlacionar os valores das leituras em “bytes” do sensor Eletrodex com os resultados obtidos pelo método padrão de estufa (gravimétrico), foram ajustadas equações de ajustes e a qualidade do ajuste foi verificada pelo coeficiente de determinação (R^2), com auxílio do aplicativo Microsoft Excel e foi testada a significância do modelo pelo teste F, por meio do programa estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013). Dessa forma, procedeu-se a calibração do sensor nos três diferentes solos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a calibração dos sensores foram ajustadas as equações lineares nos três solos estudados (Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférrico e Nitossolo Vermelho eutrófico), visto que este tipo de equação apresentou o melhor ajuste.

Nas Figuras 1, 2 e 3 estão apresentadas as curvas, e as equações de calibração e coeficiente de determinação (R^2) para o sensor Eletrodex, nos três diferentes solos: Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférrico e Nitossolo Vermelho eutrófico, respectivamente.

Figura 1. Curva de calibração obtida em laboratório do sensor Eletrodex para o Argissolo Vermelho distrófico

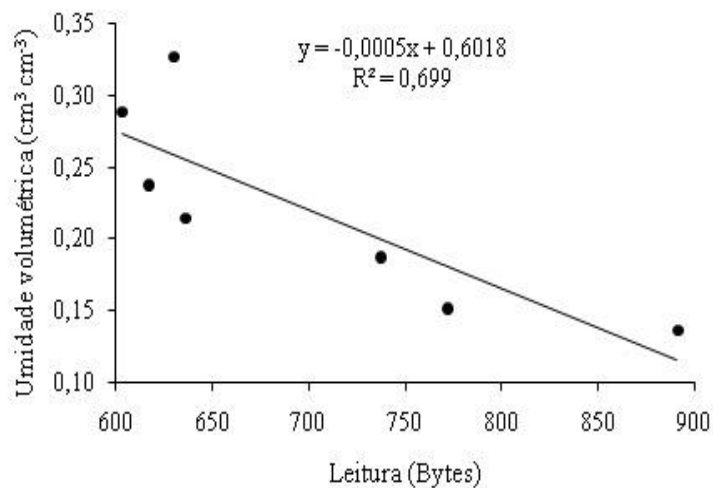


Figura 2. Curva de calibração obtida em laboratório do sensor Eletrodex para o Latossolo Vermelho distroférico

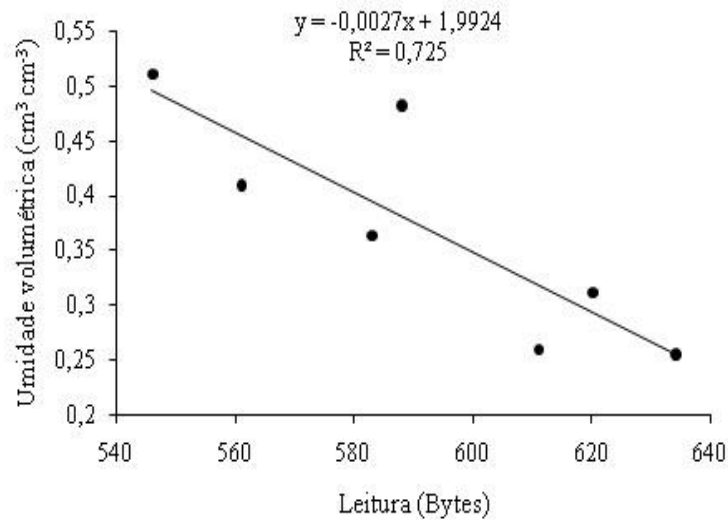
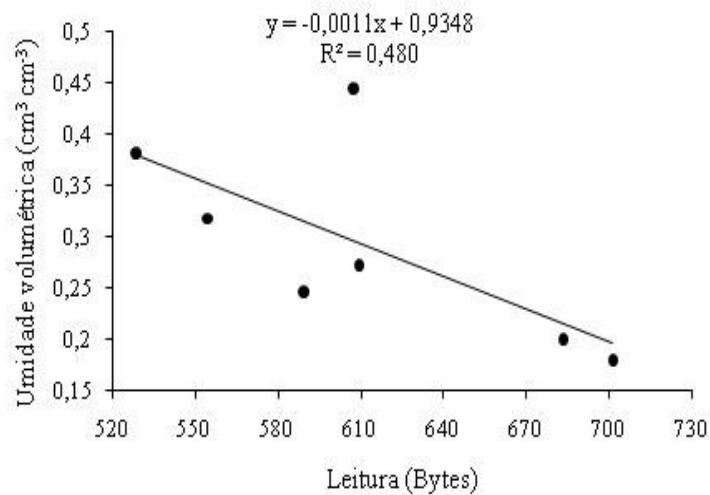


Figura 3. Curva de calibração obtida em laboratório do sensor Eletrodex para o Nitossolo Vermelho eutroférico



Na Tabela 2 estão apresentados os dados de significância do modelo de regressão para os três solos referente ao sensor Eletrodex. É observado que o modelo linear de 1º grau não foi significativo ($P > 0,05$) para o Nitossolo e significativo para o Argissolo e Latossolo ($P < 0,05$).

Tabela 2. Teste de significância do modelo linear (de primeiro grau) referente ao sensor Eletrodex para o Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico e Nitossolo Vermelho eutroférico

Fonte de variação	Quadrado médio	F	Pr>F
Argissolo	0,0203463	11,634	0,0190
erro	0,0017489		
Latossolo	0,045669	13,197	0,0150
erro	0,003460		
Nitossolo	0,0264675	4,6171	0,08438
erro	0,0057325		

Conforme observado nas Figuras 1, 2 e 3 que demonstram a calibração do sensor Eletrodex, o comportamento das leituras (em bytes) tendem a apresentar valores menores quando a umidade volumétrica do solo aumenta, ou seja, ajuste linear decrescente. Os coeficientes de determinação não se mostraram elevados, apresentando valores de 0,70, 0,72 e 0,48 para o Argissolo, Latossolo e Nitossolo, respectivamente.

A curva de calibração apresentou-se razoável para o Argissolo e Latossolo, em que a equação explicou 70% e 72% da variação da umidade do solo, respectivamente, já para o Nitossolo a equação explicou apenas 48% da variação da umidade do solo, apresentando ajuste ruim. Resultados semelhantes para o desempenho do sensor no Argissolo e Latossolo foram relatados por Ramos et al. (2014). Esses autores avaliaram a acurácia de uma sonda de capacitância (modelo Diviner 2000®) para medição da umidade em um Neossolo Quartzarênico Órtico êutrico. Nesse estudo foi verificado que a equação de calibração explicou significativamente 70% da umidade do solo.

Entretanto, é comum na literatura apresentar trabalhos com equações de calibração com coeficiente de determinação acima de 0,9. Miranda et al. (2007) ao calibrar o equipamento ECH2O (Decagon Devices) em dois solos relataram que para o Cambissolo, o sensor apresentou resposta linear com R^2 de 0,98 e para o Neossolo Quartzarênico, os autores descrevem que a equação de ajuste apresentou comportamento quadrático com R^2 de 0,94. Já Camargo et al. (2012) propuseram uma equação exponencial com R^2 de 0,92 para a sonda de capacitância EnviroSCAN® calibrada para um Neossolo em Castilla-La Mancha, Espanha.

Uma possível razão para o sensor não ter apresentado bom desempenho neste trabalho pode ser devido ao fato dos solos deste experimento possuírem teor considerável de argila (conforme pode ser observado na Tabela 1). Kaiser et al. (2010) relatam um acréscimo da constante dielétrica para teores iguais de umidade volumétrica, proporcional ao aumento do teor de argila e óxidos de ferro presentes no solo. Ainda sobre a influência do teor de argila no desempenho de sensores, Bohl e Roth (1994) mencionam a ocorrência de um comportamento anormal da constante dielétrica da água, em contato com partículas coloidais do solo (argila e matéria orgânica).

É possível observar que para o Argissolo e Nitossolo submetidos ao maior teor de água no solo, valor que corresponde a 120% da DTA, ou seja, em torno de 0,33 e 0,45 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$,

respectivamente, a leitura do sensor apresenta comportamento anormal, esse último ponto não segue a tendência dos anteriores, tal fato contribuiu para redução do coeficiente de determinação das equações de calibração nesses dois solos. Sendo assim, esse sensor apresenta desempenho comprometido nesses dois solos no maior nível de umidade. Nesse contexto, Böhme, Mathias Becker e Diekkrüger (2013) citam que solos com alto teores de água podem influenciar nas medições de sensores capacitivos.

Mesmo para a calibração do Argissolo e Latossolo que apresentaram coeficientes de determinação razoáveis (acima de 0,7), não se apresentam adequadas para a estimativa do teor de água. A utilização desse sensor não estima a umidade de forma satisfatória, causando imprecisão na mensuração desta propriedade nos três solos submetidos à calibração.

Portanto, mais estudos devem ser realizados a cerca desse sensor, trabalhos podem ser feitos para observar o comportamento de ambos em outros tipos de solos e verificar o seu desempenho em relação ao constado nesse trabalho.

6 CONCLUSÃO

Diante das condições em que o experimento foi conduzido e dos resultados obtidos, pode-se concluir que as equações de calibração do sensor avaliado não estimaram a umidade volumétrica do solo de forma satisfatória nos intervalos de umidade avaliados, em nenhum dos solos estudados e o sensor apresentou desempenho comprometido para o Argissolo e Nitossolo quando submetido à calibração no maior nível de umidade do solo.

7 REFERÊNCIAS

BOHL, H.; ROTH, K. Evaluation of dielectric mixing models to describe the θ (ϵ)-relations: Time Domain Reflectometry in environmental, infra structure, and mining applications. SYMPOSIUM AND WORKSHOP ON TIME-DOMAIN REFLECTOMETRY IN ENVIRONMENTAL, INFRASTRUCTURE, AND MINING APPLICATIONS, 1994, Evanston. **Proceedings...** Evanston: North Western University, 1994. p. 309-319.

BÖHME, B.; MATHIAS BECKER, M.; DIEKKRÜGER, B. Calibrating a FDR sensor for soil moisture monitoring in a wetland in Central Kenya. **Physics and Chemistry of the Earth**, Oxford, v. 66, p. 101-111, 2013.

CAMARGO, D. C.; TENDERO, J. I. C.; ÁLVAREZ, J. F. O.; SEVILLA, F. M. Calibração de sonda de capacitância EnviroSCAN®. **Irriga**, Botucatu, p. 27-39, 2012. Edição Especial.

COOLEY, H.; CHRISTIAN-SMITH, J.; GLEICK, P. H. **Sustaining California Agriculture in an Uncertain Future**. Oakland: Pacific Institute, 2009.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2013.

GARDNER, C. M. K.; BELL, J. P.; COOPER, J. D.; DEAN, T. J.; HODNETT, M. G.; GARDNER, N. 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.

GENSLER, D.; OAD, R.; KINZLI, K. Irrigation system modernization: A case study of the Middle Rio Grande Valley. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 135, n. 2, p. 169-176, 2009.

INOUE, M.; AHMED, O.; SAITO, T.; UZOMA, K. C. Comparison of three dielectric moisture sensors for measurement of water in saline sandy soil. **Soil Use and Management**, New Jersey, v. 24, n. 2, p. 156-162, 2008.

KAISER, D. R. REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; MINELLA, J. P. G. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 649-658, 2010.

KITIĆ, G.; CRNOJEVIĆ-BENGIN, V. A Sensor for the Measurement of the Moisture of Undisturbed Soil Samples. **Sensors**, Switzerland, v. 13, n. 2, p. 1692-1705, 2013.

KINZLI, K.; MANANA, N.; OAD, R. A comparison of laboratory and field calibration of a soil moisture capacitance probe for various soils. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 138, n. 4, p. 310-321, 2012.

KIZITO, F. CAMPBELL, C. S.; CAMPBELL, C. S.; COBOS, D. R.; TEARE, B. L.; CARTER, B.; HOPMANS, J. W. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. **Journal Hydrology**, Amsterdam, v. 352, n. 3/4, p. 367-378, 2008.

MIRANDA, F. R. SANTANA, M. G. S.; SOUZA, C. C. C. M.; OLIVEIRA, C. H. C. Calibração do sensor dielétrico ECH2O em dois tipos de solo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 38, n. 3, p. 317-321, 2007.

RAMOS, F. T.; PIVETTA, F.; MATOS, V. A. T.; SEIXAS, G. B.; CAMPELO JÚNIOR, J. H. Acurácia e calibração de uma sonda de capacitância em um Neossolo Quartzarênico cultivado com caju. **Bionscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 6, p. 1631-1641, 2014.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2013. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 10 out. 2015.

ROSEGRANT, M.; RINGLER, C.; ZHU, T. Water for agriculture: maintaining food security under growing scarcity. **Annual Review of Environment and Resources**, Stanfot, v. 34, p. 205-222, 2009.

SPELMAN, D.; KINZIL, K-D.; KUNBERGER, T. Calibration of the 10HS Soil Moisture Sensor for Southwest Florida Agricultural Soils. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 139, n. 12, p. 965-971, 2013.

SILVA, C. R.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; ALVES JÚNIOR, J.; SOUSA, A. B.; MELO, F. B.; COELHO FILHO, M. A. Calibration of Diviner 2000® capacitance probe in a Rhodic Paleudult. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, p. 636-640, 2007.

SOUZA, C. F.; DA SILVA, C. R.; DE ANDRADE JÚNIOR, A. S.; COELHO, E. F. Monitoramento do teor de água no solo em tempo real com as técnicas de TDR e FDR. **Irriga**, Botucatu, v. 1, n. 1, p. 26-42, 2016.

SOUZA, C. F.; FOLEGATTI, M. V.; MATSURA, E. E.; OR, D. Calibração da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) para a estimativa da concentração da solução no solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, p. 282-291, 2006.