



Calibração de sonda de capacitância em latossolo vermelho-amarelo

Pedro Gomes da Cruz¹, José Ricardo Macedo Pezzopane^{2(*)}, Patrícia Menezes Santos², Cristiam Bosi³, Leandro Coelho de Araujo⁴ e Renan Suaidem Parmejiani³

¹Embrapa Rondônia. Rodovia BR 364, km 5,5, Zona Rural, Caixa Postal, 127 CEP 76815-800 Porto Velho, RO. E-mail: pedro.cruz@embrapa.br

²Embrapa Pecuária Sudeste. Rodovia Washington Luiz, km 234 s/nº, Fazenda Canchim, Caixa Postal 339, CEP 13560-970 São Carlos, SP. E-mail: jose.pezzopane@embrapa.br e patricia.santos@embrapa.br

³Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Av. Pádua Dias, 11, Caixa Postal 9, CEP 13418-900 Piracicaba, SP. E-mail: cristiambosi@usp.br e renan_parmejiani@hotmail.com

⁴UNESP-Campus de Ilha Solteira. Av. Brasil Sul, 56 - Centro, CEP 15385-000 Ilha Solteira, SP. Email: leandroaraujo@bio.feis.unesp.br

(*)Autor para correspondência.

INFORMAÇÕES

História do artigo:

Recebido em 27 de novembro de 2018

Aceito em 26 de fevereiro de 2020

Termos para indexação:

Diviner 2000

solo textura média

umidade volumétrica

RESUMO

O objetivo deste estudo foi determinar equações de calibração para sonda de capacitância ao longo do perfil em um Latossolo Vermelho-Amarelo para estimativa da umidade do solo. O ensaio foi realizado na Embrapa Pecuária Sudeste situada no município de São Carlos, SP. Seguindo recomendações do fabricante, foram instalados tubos de acesso para cada condição de umidade do solo (encharcado, úmido e seco). Todas as equações de regressão foram significativas ($p < 0,0001$) e explicaram a maior parte da variação dos dados, com coeficiente de determinação (R^2) variando entre 0,71 a 0,99. A raiz do quadrado médio do resíduo variou entre 0,01 a 0,03 $m^3 m^{-3}$. Quando todas as camadas foram agrupadas até um metro de profundidade, o ajuste ao modelo potencial apresentou pior desempenho. A calibração local apresentou maiores valores de R^2 quando as camadas do solo foram agrupadas em 0 a 0,3, 0,4 a 0,6 e 0,7 a 1 m de profundidade. A variação no teor de argila influencia na capacidade de armazenamento de água no solo e, conseqüentemente, no ajuste do modelo, reforçando a importância de calibração local com o intuito de melhorar a precisão e acurácia das estimativas de umidade volumétrica do solo.

© 2020 SBAgro. Todos os direitos reservados.

Introdução

O uso de instrumentação com o intuito de determinar de forma indireta a umidade do solo é uma ferramenta importante nos estudos envolvendo as relações água-solo-planta-atmosfera. Dentre os métodos indiretos utilizados, os sensores dielétricos são alternativas viáveis para a esti-

mativa de umidade do solo, e tem recebido grande atenção na literatura nos últimos anos (Fares et al., 2004; Groves & Rose, 2004; Mwale et al., 2005; Burgess et al., 2006). Esses sensores medem a constante dielétrica do solo (K) que possui relação direta com o teor de umidade, e, baseado no princípio de funcionamento, podem ser divididos em dois grupos: reflectometria no domínio do tempo (TDR) e

reflectometria no domínio da frequência (FDR) (Mwale et al., 2005).

O Diviner 2000 (Sentek Sensor Technologies, Austrália) é um sensor capacitivo (FDR) portátil e opera em frequência acima de 100 MHz (Giraldi & Ianneli, 2009). A sonda é inserida manualmente no solo por meio de um tubo de PVC previamente instalado na vertical. Suas principais vantagens podem ser destacadas como: a segurança do operador em virtude de não haver fonte radioativa, quando comparadas às sondas de nêutrons; o fornecimento de leituras rápidas e precisas em profundidade; facilidade de operação, e a possibilidade de realizar leituras indiretas de umidade em diversos locais com apenas uma sonda (Andrade Júnior et al., 2007; Giraldi & Ianneli, 2009).

Devido à grande variabilidade de K nas diferentes classes de solo e umidades (Polyakov et al., 2005) é importante a calibração local, com o intuito de aumentar a exatidão das estimativas da umidade volumétrica. Com isso, o objetivo deste estudo foi determinar equações de calibração ao longo do perfil em um Latossolo Vermelho-Amarelo em São Carlos, SP.

Material e Métodos

O ensaio foi realizado na Embrapa Pecuária Sudeste situada no município de São Carlos, SP. O solo local é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo com textura média (Santos et al., 2006). Segundo a classificação de Köppen, o clima local é tropical de altitude, com verão quente e úmido, e inverno seco (Cwa). A precipitação pluvial média anual é de 1.300 mm e temperatura média de 21,5 °C.

Seguindo recomendações do fabricante, foram instalados seis tubos de acesso no espaçamento 5x2 m, dois para cada condição de umidade do solo (encharcado, úmido e seco). Para isso, os mesmos foram inseridos no solo com auxílio de ferramentas apropriadas, com o intuito de garantir o total contato da parede externa do tubo com o solo. Ao final da retirada de todo o solo presente dentro do tubo o mesmo foi limpo utilizando um pano umedecido em álcool 96 °GL. O final do tubo de acesso ficou a 2,5 cm da superfície do solo.

Para a condição de solo seco foi montada uma estufa com 12 m² para evitar o umedecimento do solo durante eventos de precipitação pluvial. Na condição de solo encharcado as amostragens de densidade e umidade foram realizadas um dia após o encharcamento. Em média, a umidade volumétrica do solo nas três condições foi de 27,4; 21,6 e 14,4 %, no solo encharcado, úmido e seco, respectivamente.

A cada 0,1 m foram realizadas leituras de frequência até 1 m de profundidade, sendo transformadas em frequência relativa (FR) pela relação:

$$FR = \frac{Far - F_{solo}}{Far - F_{\text{água}}}$$

sendo: Far é a leitura de frequência no tubo de acesso suspenso no ar, F_{solo} é a leitura de frequência no tubo de acesso no solo e F_{água} é a leitura de frequência no tubo de acesso submerso em água. Os valores de Far e F_{água} foram de 162.797 e 120.050 (valores adimensionais sem significado físico).

Foram realizadas em cada tubo de acesso três leituras de frequência nas diferentes condições de umidade do solo e coletadas três amostras para determinação de densidade e umidade do solo pelo método gravimétrico. O volume dos anéis usados na determinação da densidade do solo foi de 100 cm³. A umidade volumétrica foi determinada pelo método gravimétrico em estufa a 105 °C por 24 horas. Em cada camada foram realizadas análises químicas e físicas do solo.

O ajuste dos dados para predição da umidade volumétrica (Θ_v) em função da frequência relativa foi feito para o modelo potencial, dado pela relação:

$$\Theta_v = a FR^b$$

sendo: $\Theta_{v/v}$ é a umidade volumétrica em m³ m⁻³ e FR é a frequência relativa.

O ajuste do modelo potencial foi realizado para cada profundidade com auxílio do procedimento NLIN do SAS.

Resultados e Discussão

Na Tabela 1 são apresentados os resultados da análise química de macro e micronutrientes do solo. O solo apresentou um aumento no teor de alumínio em maiores profundidades chegando a 20,5% de saturação na CTC em 1 m de profundidade. Com o aumento da profundidade ocorre diminuição dos macronutrientes fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), refletindo na CTC do solo. Uma diminuição com a profundidade também é observada nos micronutrientes boro (B), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) (Tabela 1).

Como pode ser observado na Figura 1a, o solo local apresenta textura média, entretanto ocorre um aumento no teor de argila até 0,4 m de profundidade, estabilizando em torno de 33% de argila até 1 m de profundidade. A menor densidade aparente do solo observada nas camadas superficiais (0 - 0,3 m, Figura 1b) pode estar relacionada ao maior teor de matéria orgânica no solo (Tabela 1), como observado em Argissolo por Reinert et al. (2008) e em Latossolo por Genro Júnior et al. (2004).

Todas as equações de regressão foram significativas ($p < 0,0001$) explicando a maior parte da variação dos dados, com coeficiente de determinação (R^2) variando entre

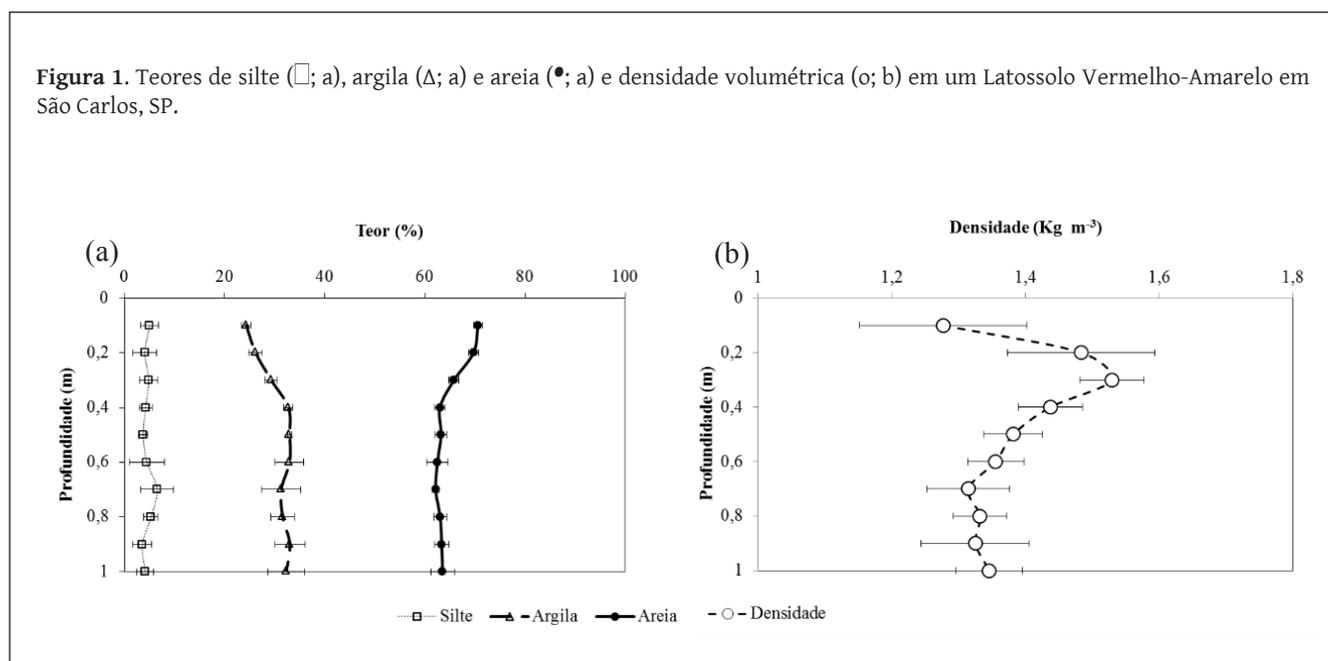
Tabela 1. Análise química de matéria orgânica (MO), hidrogênio (H), alumínio (Al), macronutrientes fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), e micronutrientes boro (Bo), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) em diferentes profundidades no Latossolo Vermelho-Amarelo em São Carlos, SP.

Profundidade cm	pH [†]	P [§] mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al	Al	CTC*	S	V	m	MO g dm ⁻³
10	5,9	4,3	0,9	30,5	10,0	23,5	0,5	64,8	41,5	63,5	0,8	24,5
20	6,0	2,5	0,8	27,3	9,3	17,3	0,3	54,5	37,5	68,3	0,5	20,0
30	6,1	1,5	0,5	25,5	8,3	18,0	0,0	52,5	34,3	65,0	0,0	12,3
40	6,1	1,3	0,4	23,5	6,5	17,8	0,0	48,3	30,3	63,0	0,0	10,0
50	6,1	1,0	0,2	20,5	5,8	16,0	0,0	42,8	26,3	62,0	0,0	7,8
60	6,1	1,0	0,3	20,3	5,5	20,5	1,0	46,5	26,0	57,0	3,8	6,0
70	5,9	1,0	0,3	20,3	5,3	21,8	2,3	47,8	25,8	55,3	9,0	7,0
80	5,9	1,0	0,2	17,0	5,0	23,3	1,5	45,8	22,0	50,3	7,5	6,8
90	5,8	1,0	0,2	17,5	5,8	23,3	2,3	46,8	23,3	51,3	10,8	6,8
100	5,5	1,0	0,2	14,0	5,8	27,3	4,3	47,3	20,0	43,8	20,5	6,3
Micronutrientes												
			B	Cu		Fe		Mn		Zn		
			mg dm ⁻³									
10			0,3	1,0		34,8		15,2		1,2		
20			0,2	1,5		30,8		13,9		0,8		
30			0,2	1,0		10,8		4,3		0,3		
40			0,1	1,2		10,0		2,6		0,3		
50			0,1	1,1		9,8		2,0		0,2		
60			0,1	1,2		8,5		1,4		0,2		
70			0,1	1,3		9,8		1,3		0,2		
80			0,1	1,1		8,8		1,6		0,2		
90			0,1	1,0		9,5		1,2		0,2		
100			0,1	0,9		8,8		1,2		0,2		

† Potencial hidrogeniônico em CaCl₂

§ Resina

* Capacidade de troca de cátions



0,71 a 0,99 (Tabela 2). A raiz do quadrado médio do resíduo (RQMR), que é um indicador de acurácia do modelo, variou entre 0,01 a 0,03 m³ m⁻³.

Quando todas as camadas são agrupadas até um metro de profundidade o ajuste ao modelo potencial apresentou uma menor acurácia, demonstrando limitações (Tabela 2; Figura 2a). O ajuste que melhor se aproximou da calibração do fabricante foram nas camadas de 0 a 0,3 m de profundidade (Figura 2b). Isso pode indicar que as camadas iniciais apresentaram características similares na retenção de água à utilizada pelo fabricante (solo arenoso). Nas condições de solos brasileiros, Andrade Júnior et al. (2007) e Silva et al. (2007) observaram calibrações semelhantes à calibração original da sonda de capacitância, em Latossolo Amarelo e Argissolo Vermelho-Amarelo no Estado do Piauí, respectivamente.

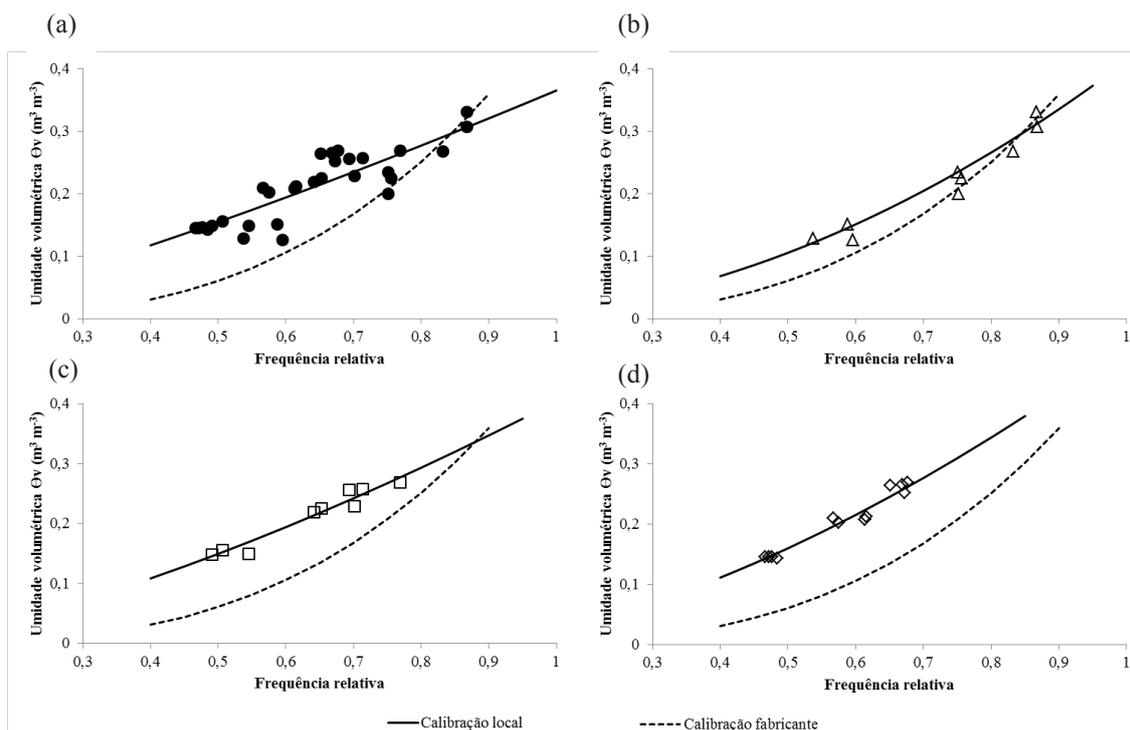
No solo local a calibração apresentou maiores valores de R² quando as camadas do solo foram agrupadas (Tabela 2; Figura 2b, c e d). As camadas de 0 a 0,3 m, 0,4 a 0,6 m e 0,7 a 1 m de profundidade apresentaram bom ajuste sem comprometer o número de observações (acima do mínimo de seis). A variação no teor de argila (Figura 1) pode ter influenciado na capacidade de armazenamento do solo e consequentemente no ajuste do modelo potencial ao longo do perfil. Groves & Rose (2004) encontraram altos valores de R² ajustado (>0,93) na calibração em laboratório

Tabela 2. Equações de calibração e coeficiente de determinação (R²) da sonda de capacitância nas camadas de 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1, 0 – 0,3, 0,4 – 0,6, 0,7 – 1 e 0 – 1 m de profundidade para um Latossolo Vermelho Amarelo.

Profundidade (m)	Equação†	n‡	R2		p-valor
Camadas a 0,1 m					
0 – 0,1	$\Theta_v = 0,389FR^{1,97}$	6	0,87	0,03	p<0,0001
0,11 – 0,2	$\Theta_v = 0,476FR^{2,61}$	6	0,99	0,01	p<0,0001
0,21 – 0,3	$\Theta_v = 0,366FR^{1,64}$	6	0,99	0,01	p<0,0001
0,31 – 0,4	$\Theta_v = 0,415FR^{1,67}$	6	0,98	0,01	p<0,0001
0,41 – 0,5	$\Theta_v = 0,417FR^{1,44}$	6	0,99	0,01	p<0,0001
0,51 – 0,6	$\Theta_v = 0,446FR^{1,56}$	6	0,99	0,01	p<0,0001
0,61 – 0,7	$\Theta_v = 0,490FR^{1,70}$	6	0,95	0,01	p<0,0001
0,71 – 0,8	$\Theta_v = 0,477FR^{1,58}$	6	0,88	0,02	p<0,0001
0,81 – 0,9	$\Theta_v = 0,506FR^{1,61}$	6	0,97	0,01	p<0,0001
0,91 – 1	$\Theta_v = 0,551FR^{1,77}$	6	0,92	0,02	p<0,0001
Camadas a 0,3 m					
0 – 0,3	$\Theta_v = 0,413FR^{1,97}$	18	0,90	0,02	p<0,0001
0,4 – 0,6	$\Theta_v = 0,404FR^{1,43}$	18	0,93	0,01	p<0,0001
0,7 – 1	$\Theta_v = 0,495FR^{1,63}$	24	0,91	0,01	p<0,0001
Todas as camadas					
0 – 1	$\Theta_v = 0,366FR^{1,24}$	60	0,71	0,03	p<0,0001

† Θ_v – umidade volumétrica em m³ m⁻³ e FR – frequência relativa
 ‡ número de observações
 * Raiz do quadrado médio do resíduo (m³ m⁻³)

Figura 2. Curva de calibração da sonda de capacitância para um Latossolo Vermelho Amarelo e calibração do fabricante nas profundidades de 0 – 1 m (a, ●), 0 – 0,3 m (b, Δ), 0,4 – 0,6 m (c, □) e 0,7 – 1 m (d, ◇).



para solo argiloso (densidade volumétrica de 1,09 kg m⁻³). Já Mwale et al. (2005), com calibração a campo, observaram variações nas estimativas de umidade volumétrica do solo ao longo do perfil, paralelamente com o aumento nos teores de argila e silte, resultados semelhantes ao observado neste estudo. Burgess et al. (2006) também observaram menor precisão (R²=0,80) na calibração local a campo em solo argiloso (55% de argila e 26% de silte), onde um dos motivos atribuídos a menor precisão pode estar relacionado ao tamanho pequeno da área de leitura da constante dielétrica do solo realizada pelo aparelho (k; cerca de 0,1 m do tubo de acesso).

As diferenças nas equações de calibração apresentadas reforçam a importância de calibração local de forma a melhorar a precisão e acurácia das estimativas de umidade volumétrica do solo.

Conclusão

A calibração local no Latossolo Vermelho-Amarelo textura média apresentou melhor precisão e acurácia quando o perfil do solo foi agrupado em camadas buscando representar as diferenças de textura no perfil do solo.

Agradecimentos

Ao CNPq (Processo 475525-2010-8) pelo suporte financeiro.

Referências

- ANDRADE JÚNIOR, A.S.; SILVA, C.R.; DANIEL, R. Calibração de um sensor capacitivo de umidade em Latossolo Amarelo na microrregião do Litoral Piauiense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.2, n.4, p.303-307, 2007.
- BURGESS, P.J.; REINHARD, B.R.; PASTUREL, P. Compatible measurements of volumetric soil water content using a neutron probe and Diviner 2000 after field calibration. **Soil Use and Management**, Oxford, v.22, n.4, p.401-404, 2006.
- FARES, A.; BUSS, P.; DALTON, M.; EL-KADI, A.I.; PARSONS, L.R. Dual field calibration of capacitance and neutron soil water sensors in a shrinking-swelling clay soil. **Vadose Zone Journal**, Madison, v.3, n.4, p.1390-1399, 2004.
- GENRO JÚNIOR, S.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.28, n.3, p.477-484, 2004.
- GIRALDI, D.; IANNELI, R. Measurements of water content distribution in vertical subsurface flow constructed wetlands using a capacitance probe: benefits and limitations. **Desalination**, Amsterdam, v.243, n.1, p.182-194, 2009.
- GROVES, S.J.; ROSE, S.C. Calibration equations for Diviner 2000 capacitance measurements of volumetric soil water content of six soils. **Soil Use and Management**, Oxford, v.20, n.1, p.96-97, 2004.
- MWALE, S.S.; AZAM-ALI, S.N.; SPARKES, D.L. Can the PR1 capacitance probe replace the neutron probe for routine soil-water measurement? **Soil Use and Management**, Oxford, v.21, n.3, p.340-347, 2005.
- POLYAKOV, V.; FARES, A.; RYDER, M.H. Calibration of a capacitance system for measuring water content of tropical soil. **Vadose Zone Journal**, Madison, v.4, n.4, p.1004-1010, 2005.
- REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M.; AITA, C.; ANDRADA, M.M.C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.32, n.5, p.1805-1816, 2008.
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; OLIVEIRA, J.B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- SILVA, C.R.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; ALVES JÚNIOR, J.; SOUZA, A.B.; MELO, F.B.; COELHO FILHO, M.A. Calibration of a capacitance probe in a paleudult. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.64, n.6, p.636-640, 2007.

REFERENCIAÇÃO

CRUZ, P. G.; PEZZOPANE, J. R. M., SANTOS, P. M.; BOSI, C.; ARAUJO, L. C.; PARMEJIANI, R. S. Calibração de sonda de capacitância em latossolo vermelho-amarelo. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.26, n.2, p.347-352, dez 2018.



Calibration of capacitance probe in a typic hapludox

Pedro Gomes da Cruz¹, José Ricardo Macedo Pezzopane^{2(*)}, Patricia Menezes Santos², Cristiam Bosi³, Leandro Coelho de Araujo⁴ and Renan Suaidem Parmejiani³

¹Embrapa Rondônia. Rodovia BR 364, km 5,5, Zona Rural, Caixa Postal, 127 CEP 76815-800 Porto Velho, RO, Brazil. E-mail: pedro.cruz@embrapa.br

²Embrapa Pecuária Sudeste, Rodovia Washington Luiz, Km 234 s/nº, Fazenda Canchim, Caixa Postal 339, CEP 13560-970 São Carlos, SP, Brazil.

E-mail: jose.pezzopane@embrapa.br and patricia.santos@embrapa.br

³Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Av. Pádua Dias, 11, Caixa Postal 9, CEP 13418-900 Piracicaba, SP, Brazil.

E-mail: cristiambosi@usp.br and renan_parmejiani@hotmail.com

⁴UNESP-Campus de Ilha Solteira. Av. Brasil Sul, 56 - Centro, CEP 15385-000 Ilha Solteira, SP, Brazil. Email: leandroaraujo@bio.feis.unesp.br

(*)Corresponding author.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 November 2018

Accepted 26 February 2020

Index terms:

Diviner 2000

medium-textured soil

volumetric water content

ABSTRACT

The aim of this study was to determine calibration equations of capacitance probe in layers in a Red-yellow Latosol to estimate soil moisture. The test was carried out at Embrapa Southeast Cattle Research Center in São Carlos, São Paulo State, Brazil. Following manufacturer's recommendations, access tubes were installed for each soil moisture (wet, moist and dry). All the regression equations were significant ($p < 0.0001$) and accounted for most of the variation in the data, with a coefficient of determination (R^2) ranging from 0.71 to 0.99. The root mean square error ranged from 0.01 to 0.03 $m^3 m^{-3}$. When all the layers grouped up to one meter depth, the adjustment to the potential model presented worse performance. The local calibration had higher R^2 when the soil layers were grouped into 0 to 0.3, 0.4 to 0.6 and 0.7 to 1 m depth. The variation in clay content may have influenced the water soil storage and therefore the adjustment of the model, reinforcing the importance of local calibration in order to improve the precision and accuracy of soil volumetric water estimates.

© 2020 SBAgro. All rights reserved.

CITATION

CRUZ, P. G.; PEZZOPANE, J. R. M.; SANTOS, P. M.; BOSI, C.; ARAUJO, L. C.; PARMEJIANI, R. S. Calibração de sonda de capacitância em latossolo vermelho-amarelo. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.26, n.2, p.347-352, dez 2018.