



CALIBRAÇÃO DE SONDA TDR E DESEMPENHO DE MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DE UMIDADE EM ARGISSOLO

Paloma Francisca de Almeida¹, Robson Bonomo², Fábio Oseias dos Reis³, Mariana Vasconcelos Barroca⁴, Joabe Martins de Souza⁵

RESUMO

O Time-Domain Reflectometry (TDR) ou, reflectometria no domínio do tempo, é uma das técnicas utilizadas para medida de umidade de solo, tendo a necessidade de fazer a calibração do aparelho para que se tenha a adequação e exatidão nas medidas a ser realizado. Portanto, objetivou-se avaliar calibração de sonda TDR e desempenho de modelos para determinação de umidade em um Argissolo Amarelo no Norte do Espírito Santo em duas profundidades e tipos de amostras. Foram seguidas duas metodologias, a do fabricante do TDR-ML3 e a utilizada por Coelho et al. (2006), em um Argissolo Amarelo com amostras deformadas e indeformadas, nas profundidades de 0-20 e de 20-50 cm. Concluiu-se que o uso de amostras indeformadas para calibração do equipamento é o mais indicado, a profundidade que apresentou melhor desempenho foi a de 0 a 20 cm. Os valores de umidade do solo obtidos pelo modelo do fabricante e os de calibração apresentaram valores superestimados em relação a umidade do solo obtida pelo método padrão de umidade do solo. As menores superestimativas foram obtidas pelo modelo de TDR, seguindo pelo modelo de calibração de Ledieu para um Argissolo do Norte do Espírito Santo.

Palavras-Chave: Umidade do solo, Reflectometria no Domínio do Tempo, Amostras indeformadas e deformadas.

TDR PROBE CALIBRATION AND MODEL PERFORMANCE TO DETERMINE MOISTURE IN ULTISOL

¹Mestranda em Agricultura Tropical, Centro Universitário Norte do Espírito Santo, Universidade Federal do Espírito Santo (CEUNES/UFES), e-mail: paloma.panci@hotmail.com

²Professor do Departamento de Ciências Agrárias e Biológicas, Centro Universitário Norte do Espírito Santo Universidade Federal do Espírito Santo (CEUNES/UFES), e-mail: robsonbonomo@gmail.com

³Pós-Doutorando em Agronomia/Fitotecnia pela Universidade Federal de Lavras. e-mail: foseias@yahoo.com.br

⁴Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Paraná, e-mail: marianavbarroca@hotmail.com

⁵Pós Doutorando em Agricultura Tropical pela Universidade Federal do Espírito Santo. e-mail: joabenv@gmail.com

ABSTRACT

Time-Domain Reflectometry (TDR) or time-domain reflectometry is one of the techniques used to measure soil moisture, so if you need to calibrate the device to have the correctness and accuracy of the measures to be taken accomplished. Therefore, the objective of this study was to evaluate TDR probe calibration and performance of models for determining moisture in a yellow Ultisol in the North of Espírito Santo at two depths and sample types. Two methodologies were followed: the manufacturer of TDR-ML3 and the one used by Coelho et al. (2006), so the present work was used only present in the north of Espírito Santo, the Yellow Argisol in deformed and undisturbed samples, in the depth of 0-20 and 20-50 cm. It was concluded that the use of undisturbed samples for calibration of the equipment is the most suitable for laboratory conditions, the depth that presented the best performance was 0-20 cm and the calibration model that presented the best results of the determination coefficient was the of Ledieu et al. (1986), being among the others, the most suitable for calibration, in order to have greater accuracy in the measurements performed with soil from the North of Espírito Santo.

Keywords: Soil moisture, Time Domain Reflectometry, Types of Soil Argillaceous.

INTRODUÇÃO

O conhecimento do manejo de água no solo tem ganhado cada vez mais importância considerando os problemas hídricos atuais. A agricultura irrigada utiliza grandes volumes de água e depende do conhecimento aprofundado nesse assunto para garantir eficiência de aplicação de água. Os métodos mais utilizados para o correto manejo de irrigação são aplicados por meio dos dados atmosféricos ou do acompanhamento da umidade do solo (GAVA et al., 2016).

O manejo da irrigação via solo segundo Dabach et al. (2016) é fundamentado no monitoramento do conteúdo e na disponibilidade de água no solo. Esse manejo tem como princípio determinar a umidade do solo na zona do sistema radicular e repor o volume de água necessário até atingir a capacidade de campo do solo, o qual ainda segundo Nunes et al. (2015) propicia a estimativa do momento e da quantidade de água que deve ser fornecida ao solo para a manutenção do cultivo sob condições hídricas adequadas, na busca da maximização da produtividade.

De acordo com Topp & Ferré (2002), as técnicas para medida de umidade do solo podem ser diretas ou indiretas. Os métodos diretos, envolve a retirada ou a separação da

água da matriz do solo com a medida direta da água que foi removida, enquanto o método indireto, é determinado por alguma propriedade física ou química relacionada a umidade do solo, a constante dielétrica, a condutividade elétrica, a capacidade térmica, conteúdo de H ou susceptibilidade magnética.

Dentre os métodos indiretos para a estimativa do teor de água no solo, a técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) se destaca em relação aos demais, principalmente por ser um método rápido, não destrutivo e que possibilita a automação da aquisição dos dados (BIZARI et al., 2011).

Em trabalho de Souza et al. (2016) avaliando a calibração de TDR em um Latossolo Vermelho Amarelo verificaram que o modelo de TDR utilizado teve sua aplicabilidade, no campo, viabilizada, com um ajuste excelente e baixos erros na estimativa da umidade do solo para o tipo de solo estudado, ainda apresentou eficaz para o monitoramento da água no solo em diferentes camadas.

Para calibração da TDR os modelos podem ser de natureza empírica (modelos que não levam em consideração os efeitos dos componentes da constante dielétrica (ϵ) e das propriedades físicas do solo por não serem os mais adequados), natureza semi-empírica ou física (TOPP et al., 1980; TOMMASELLI, 2001; NOBORIO, 2001). Dentre os modelos,

CALIBRAÇÃO DE SONDA TDR E DESEMPENHO DE MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DE UMIDADE EM ARGISSOLO

destacam-se os de Dobson et al. (1985) e de Roth et al. (1990). Outros modelos envolvem parâmetros físicos do solo, tais como: os de Malicki et al. (1996) e Whalley (1993). O modelo de Topp et al. (1980) e o de Ledieu et al. (1986) têm sido muito usados, estando inseridos nos equipamentos de TDR dos fabricantes, sendo estes modelos de caráter empírico.

Diante disso objetivou-se nesse trabalho avaliar calibração de sonda TDR e desempenho de modelos para determinação de umidade em um Argissolo Amarelo no Norte

do Espírito Santo em duas profundidades e com amostras deformadas e indeformadas.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental do CEUNES/UFES localizado no município de São Mateus - ES, nas coordenadas 18°43'S e 39°51'W, a cerca de 39 m de altitude. O solo utilizado foi o Argissolo Amarelo, segundo classificação de Embrapa (2013), a análise textural do solo pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1. Características texturais do solo utilizados na calibração do TDR, nas quatro trincheiras e em diferentes camadas

Camadas	Trincheiras	Areia	Argila	Silte
		g kg ⁻¹		
0-20	1	759	223	18
	2	805	168	27
	3	824	156	20
	4	840	128	32
20-50	1	600	377	22
	2	757	201	41
	3	739	226	35
	4	521	437	42

O delineamento experimental empregado foi inteiramente casualizado em esquema de parcela subdividida, com quatro repetições. Nas parcelas foram avaliados tipo de amostra, sendo empregadas amostras deformadas e indeformadas. Nas subparcelas foram avaliadas duas profundidades de amostragem do solo, isto é, camada de 0 – 0,20 m e camada de 0,20 – 0,50 m.

Foram seguidas duas metodologias de calibração, a do fabricante do TDR (Delta-T Devices Ltd) e a de Coelho et al. (2006) baseada em modelos de calibração com estimativas de ϵ em função de θ obtidas. As amostras deformadas foram destorroadas e secas ao ar, posteriormente acondicionadas em colunas de PVC de 0,15 m de altura e 0,10 m de diâmetro, enquanto as amostras indeformadas foram retiradas do solo diretamente dentro das colunas mantendo sua estrutura. As bases das colunas de solo foram protegidas com um pano de algodão e

colocadas em seguida para saturação. As colunas foram devidamente pesadas.

Nas colunas foram inseridas, após a saturação, sensores de umidade baseados no princípio do TDR (“Time Domain Reflectometer”), com guias de onda ML3, (Delta-T Devices Ltd). Uma vez inseridas as guias de onda no solo saturado, as colunas foram pesadas e colocadas para perda de umidade sob condições naturais a sombra, até que atingisse cerca de 5% de umidade. As leituras de umidade do solo e a pesagem das colunas foram feitas diariamente.

As leituras foram armazenadas por um datalogger “DL2e”, e seguiu até a umidade do solo atingir valores próximos do limite inferior da disponibilidade de água do solo, em seguida, retiraram-se as sondas, pesou-se a coluna que posteriormente foi levada à estufa a 105 °C até atingir massa constante (Ms). As umidades volumétricas tomadas a cada leitura

(θ_i) ($m^3 m^{-3}$) foram obtidas por gravimetria, isto é, conforme equação 1.

$$\theta_i = \frac{Mu - Ms}{V_{amostra}} \quad (1)$$

em que: Mu é a massa do solo úmido atual (kg); Ms é a massa do solo seco (kg) e $V_{amostra}$ (dm^3) é o volume da amostra.

As estimativas de ε em função de θ obtidas por três modelos de calibração foram comparadas aos dados de ε lidas no equipamento de TDR e das umidades do solo correspondentes em base volumétrica ao método padrão. O modelo de Roth et al. (1990) leva em conta ε como uma resultante de componentes da matriz do solo (ε_s), do ar (ε_a) e da água (ε_w), conforme equação 2.

$$\varepsilon^\alpha = \theta\varepsilon_w^\alpha + (1 - P)\theta\varepsilon_s^\alpha + (P - \theta)\theta\varepsilon_a^\alpha \quad (2)$$

$$\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2}\varepsilon - 5,5 \times 10^{-4}\varepsilon^2 + 4,3 \times 10^{-6}\varepsilon^3 \quad (4)$$

$$\theta = 0,1138\sqrt{\varepsilon} - 0,1758 \quad (5)$$

em que: ε é a constante dielétrica (adimensional), d_s é a densidade do solo ($Mg m^{-3}$), P corresponde à porosidade total e θ à umidade do solo ($m^3 m^{-3}$).

Os valores obtidos, pelo TDR e através dos modelos de calibração, foram comparados ao método padrão (valores calculados das avaliações nas amostras), onde foram testadas pela inspeção visual em gráficos 1:1 e dos indicadores estatísticos erro médio (ME), erro médio quadrático (RMSE), e coeficiente de determinação (R^2). O ME e o RMSE foram obtidos através das equações 6 e 7, respectivamente. Também foi realizado o cálculo de Desvio Padrão (DV), a partir da equação 8, permitindo assim a obtenção das umidades em base gravimétricas correspondentes a cada tipo de amostra e profundidades, traçado assim as curvas de regressão para o ajuste das umidades do solo.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - o_i) \quad (6)$$

em que: ε é a constante dielétrica (adimensional), P corresponde à porosidade total ($m^3 m^{-3}$) e θ à umidade do solo ($m^3 m^{-3}$); α leva em conta os efeitos do arranjo geométrico dos componentes do meio na ε . O valor inicial de α foi de 0,5 conforme Topp et al., 1980; Ledieu et al., 1986; Roth et al., 1990 e Malicki et al., 1996. Os valores de ε_s , ε_a e de ε_w , adotados em todos os cálculos, foram 5, 1 e 77, respectivamente.

O modelo de Malicki et al. (1996) está relacionando a umidade do solo e ε com inclusão da densidade do solo (d_s), conforme equação 3. Já o modelo de Topp et al. (1980) consiste numa polinomial do terceiro grau para estimativa dos teores de água, em função da ε , conforme equação 4, e o modelo de Ledieu et al. (1986) é dado pela equação 5.

$$\theta = \frac{\varepsilon^{0,5} - 0,819 - 0,168d_s - 0,159d_s^2}{7,17 + 1,18d_s} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - o_i)^2} \quad (7)$$

$$DV = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \left| \frac{e_i - o_i}{o_i} \right| \cdot 100 \quad (8)$$

em que n é o número de leituras, e_i e o_i são valores da umidade do solo medidos e estimados, respectivamente.

Os resultados foram submetidos à análise de variância pelo teste de Tukey a 5% probabilidade, por meio do Software estatístico ASSISTAT versão 7.7 (SILVA & AZEVEDO, 2016).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As interações entre a umidade do solo das amostras, obtidas pela leitura do aparelho de TDR e pelo método gravimétrico (Padrão), observadas nas Figuras 1A e 1B representam a variação entre os diferentes tipos de amostras, sendo que a Figura 1A representa às amostras indeformadas e a Figura 1B as deformadas.

CALIBRAÇÃO DE SONDA TDR E DESEMPENHO DE MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DE UMIDADE EM ARGISSOLO

Pode ser verificado a partir do coeficiente de determinação e pela correlação de Pearson que as amostras deformadas apresentaram resultados superestimados quando comparadas as indeformadas, em relação ao

TDR e ao modelo padrão, o mesmo foi encontrado por Codrim (2009), em que as amostras indeformadas apresentaram maior precisão na estimativa de umidade do solo.

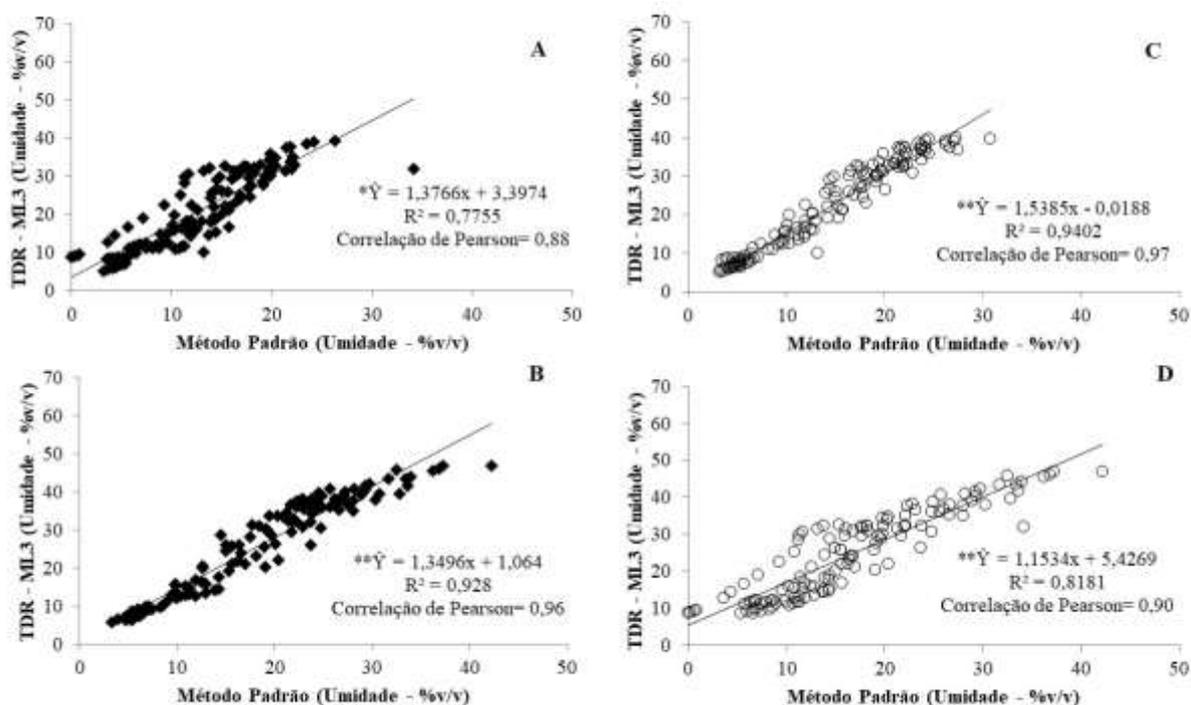


Figura 1. Equações de ajuste do TDR – ML3 em relação ao método padrão de determinação da umidade do solo, em dois tipos de amostras, deformada (A) e indeformada (B), e em duas profundidades, 0-20 cm (C) e 20-50 cm (D).

Quando comparado à profundidade, de acordo com os resultados das Figuras 1C e 1D, a profundidade de 0-20 cm mostrou resultados superiores a de 20-50 cm em relação ao coeficiente de determinação e consequentemente o coeficiente de Pearson.

Esses resultados podem ter sido por influência da textura mais argilosa na profundidade de 20-50 cm, resultados que corroboram com Souza et al. (2013), que verificou que o TDR superestimou valores de teor de água em solos mais argilosos e subestimou em solos com teores de argila inferiores, evidenciando assim, a necessidade de calibrar o equipamento para futuras análises. Resultados semelhante evidenciado por Souza et al. (2016), que verificaram que as estimativas da umidade do solo para um Latossolo Vermelho Amarelo apresentaram menor desempenho e maior erro na textura

argilosa, porém não inviabilizou as leituras pela técnica TDR, porém diferindo desse trabalho os autores observaram que as profundidades estudadas não afetaram o desempenho do TDR, mostrando a sua eficaz para o monitoramento da água no solo em diferentes camadas.

Esses resultados anteriores mostrados podem ser explicados, já que o teor de argila do solo, aumenta a superfície específica gerando maior quantidade de água adsorvida e menor quantidade de água livre na matriz do solo, apresentando constante dielétrica bem abaixo daquela da água livre como relatado por Muñoz-Carpena (2015) e Santos et al. (2010). Ainda segundo Kaiser et al. (2010) 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.

Analisando as amostras de solo deformadas e amostras de solo indeformadas, nas duas profundidades, através das Figuras 2A e 2B, para deformadas e 2C e 2D para indeformadas, observa-se que os resultados obtidos foram próximos para os dois tipos de

amostras. Contudo, a análise entre amostra e profundidade, observa-se a que de melhor resultado foi o da amostra deformada de 0-20 cm, porém, a amostra indeformada de 20-50 cm, também demonstrou resultados expressivos.

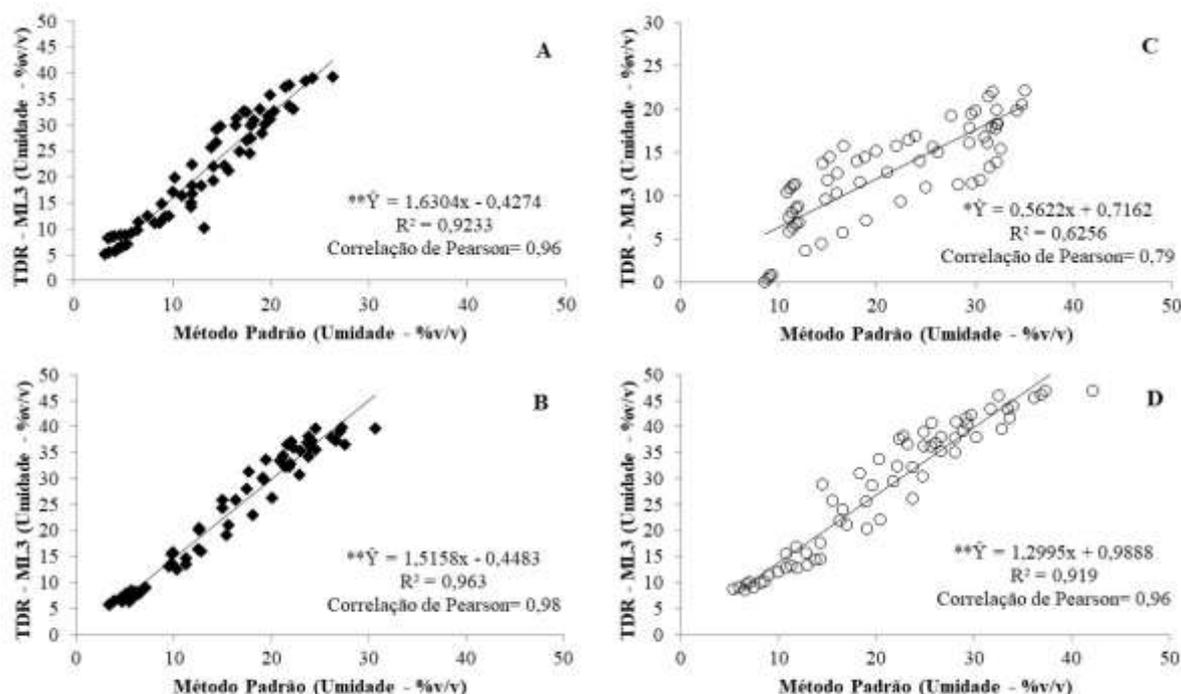


Figura 2. Equações de ajuste do TDR – ML3 em relação ao método padrão de determinação da umidade do solo, em amostras deformadas na profundidade de 0-20 cm (A) e 20-50 cm (B), e amostras indeformadas a 0-20 cm (C) e 20-50 cm (D).

O coeficiente de determinação (R^2), apresentou maior valor para amostras indeformada e para profundidade de 0-20 cm, já os maiores valores de desvio padrão (DV) foi verificado em amostras deformadas e na profundidade de 0-0,20 cm, com desvio

próximo a profundidade de 20-50 cm, já o menor desvio padrão foi encontrado em amostras indeformadas, mostrando a importância da utilização desse tipo de amostras nas análises de solo, se mostrando mais homogêneas que as demais (Tabela 2).

Tabela 2. Valores médios dos coeficientes de determinação (R^2) e desvio Padrão (DV) das umidades do solo resultante das amostras deformadas e indeformadas e profundidade do solo

		R^2	DV (%)
Amostras	Deformada	0,83509	40,65
	Indeformada	0,86732	29,77
Profundidade	0-20 cm	0,88157	35,90
	20-50 cm	0,82084	34,52

Quando analisadas as equações individualmente, em relação valores de umidade do solo e constate dielétrica obtidos pelo modelo gravimétrico, todos os modelos superestimaram a umidade do solo, com

superestimavas de 11,84; 11,60 e 10,88 % (v/v) para os modelos de Malicki et al. (1996), Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986) respectivamente (Figuras 3A, 3B e 3C). Já o sensor ML3 apresentou a menor

CALIBRAÇÃO DE SONDA TDR E DESEMPENHO DE MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DE UMIDADE EM ARGISSOLO

superestimavas de 9,21%, tendo uma tendência de menor erro quando utilizado em umidade do solo baixas, ao contrário do modelo de Malicki et al. (1996) que há uma tendência de diminuição do erro em umidades mais elevadas do solo (Figura 3D). Já Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986) apresentam o mesmo comportamento nos diferentes conteúdos de água no solo. Kaiser et al. (2010) estudando um Argissolo, dois Latossolos e um

Nitossolo relatam que os modelos propostos por Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986) não se mostraram adequados para estimar a umidade do solo das classes de solo estudadas, o mesmo resultado encontrado nesse trabalho. Ainda segundo Tommaselli (2001) o termo cúbico do modelo proposto por Topp et al. (1980) deixa de ser importante à medida que a textura do solo se torna mais grosseira.

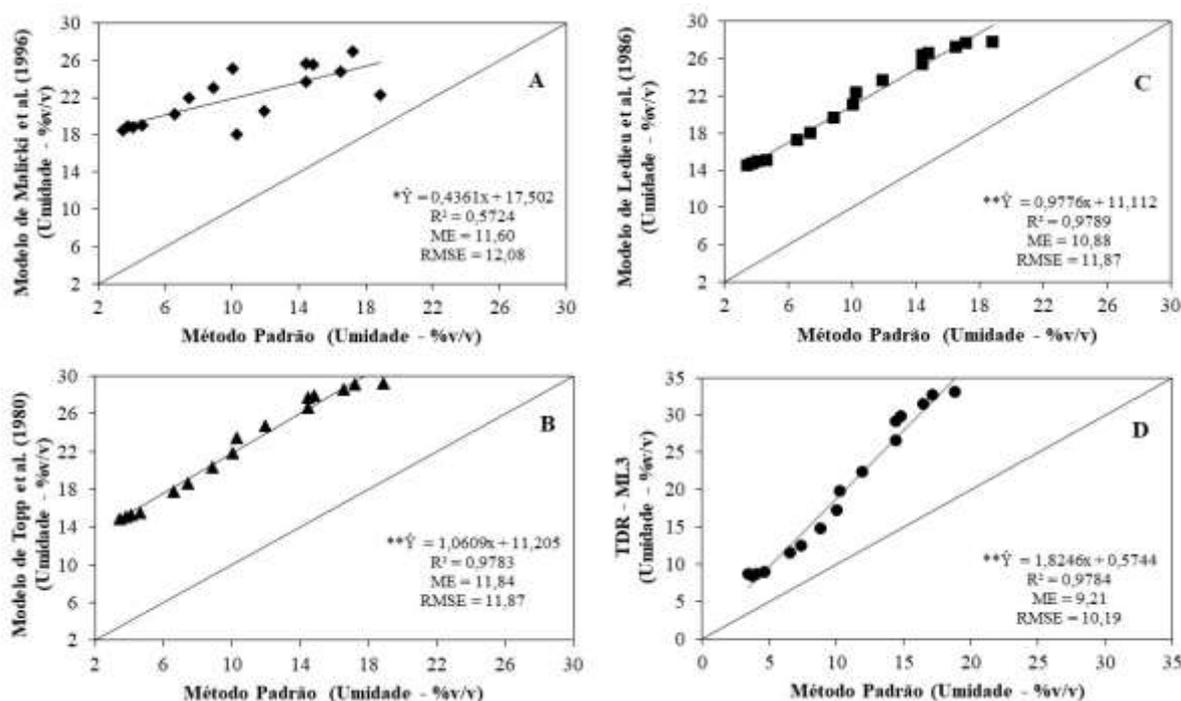


Figura 3. Estimativa de teores de água do modelo gravimétrico (Padrão) pelo modelo proposto por Malicki et al. (1996) (A), Topp et al. (1980) (B), Ledieu et al. (1986) (C) e TDR – ML3 (D).

Os resultados mostraram que o uso de modelos pré-ajustados, com coeficientes fixos, pode estar sujeito a imprecisões nas estimativas da umidade do solo e da constante dielétrica, e que o tipo de amostragem e a profundidade do solo exercem influência no desempenho dos modelos. O uso da equação indicada pelo sensor, não deve ser ignorada, a partir dos resultados, verificou-se que ela apresentou diferenças mínimas quando comparadas aos demais modelos.

CONCLUSÕES

Os valores de umidade do solo obtidos pelo modelo do fabricante e os de calibração apresentaram valores superestimados em relação a umidade do solo obtida pelo método padrão de umidade do solo.

As menores superestimavas foram obtidas pelo modelo de TDR, seguindo pelo modelo de calibração de Ledieu.

O TDR utilizado tem sua aplicabilidade viabilizada, com um ajuste excelente e baixos erros na estimativa da umidade do solo, sendo o uso de amostras indeformadas para calibração o mais indicado, para condição de laboratório, com menores desvios e maiores coeficientes de determinação.

Na camada de 0-20 cm, que possui textura arenosa, obteve-se melhor calibração para sonda TDR em relação a camada de 20-50 cm, que apresenta maior teor de argila.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIZARI, D. R.; MATSURA, E. E.; SOUZA, C. F.; ROQUE, M. W. Haste portátil para utilização de sondas de TDR em ensaios de campo. **Irriga**, Botucatu, v.16, n.1, p.31-41, 2011.
- CODRIM, C. E. **Otimização da Irrigação Localizada em Pomares de Manga no Semi-Árido Baiano**. 2009. 177 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.
- COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; LEDO, C. A. S. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n. 1, p.23-30, 2006.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2013. 353p
- DABACH, S.; SHANIA, U.; LAZAROVITCH, N. The influence of water uptake on matric head variability in a drip-irrigated root zone. **Soil & Tillage Research**, Amsterdã, v.155, p.216-224, 2016.
- DOBSON, M. C.; ULABY, F. T.; HALLIKAINEN, M. T.; ELRAYES, M. A. Microwave dielectric behavior of wet soil: II Dielectric mixing models. **Ieee transactions on geoscience and remote sensing**, v.23, n.1, p. 35-46, 1985.
- GAVA, R.; SILVA, E. E.; BAILO, F. H. R. Calibração de sensor eletrônico de umidade em diferentes texturas de solo. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Tupã, v. 10, n. 2, p.154-162, 2016.
- 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.
- LEDIEU, J.; DE RIDDER, P.; DE CLERCK, P.; DAUTREBANDE, S. A method for measuring soil water moisture by time-domain reflectometry. **Journal of Hydrology**, v. 88, n.3-4, p.319- 328, 1986.
- MALICKI, M. A.; PLAGGE, R.; ROTH, C.H. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. **European Journal of Soil Science**, v. 47, n. 3, p.357- 366, 1996.
- MUÑOZ-CARPENA, R. **Field Devices For Monitoring Soil Water Content**. Agricultural and Biological Engineering Department, University of Florida. Publication , 2015.
- NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: A review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 31, n. 3, p.213-237, 2001.
- NUNES, M. S.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; BRAGA, F. V. A.; BRAGAGNOLO, J. Comparação de lâminas brutas obtidas por métodos via solo e demanda evaporativa para manejo da irrigação. **Tecnologia & Ciências Agropecuária**, João Pessoa, v.9, n.1, p.39-43, 2015.
- ROTH, C. H.; SCHULIN, R.; FLUHLER, H.; ATTINGER, W. Calibration of time-domain reflectometry for water content measurement using composite dielectric approach. **Water Resources Research**, v.26 n. 10, p.2267-2273, 1990.

CALIBRAÇÃO DE SONDA TDR E DESEMPENHO DE MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DE UMIDADE EM ARGISSOLO

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

SILVA, F. de A. S. e.; AZEVEDO, C. A. V. de. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research**, v.11, n.39, p.3733-3740, 2016.

SOUZA, C. F.; PIRES, R. C. M.; MIRANDA, D. B. de.; VARALLO, A. C. T. Calibração de sondas FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Irriga**, Botucatu, v.18, n.4, p.597- 606, 2013.

SOUZA, J. M.; REIS, E. F.; BONOMO, R.; PEREIRA, L. R. Calibração de sonda TDR em um Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 10, n. 6, p. 1049 - 1055, 2016

TOMMASELLI, J. T. G.; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 9, p. 1145-1154, 2001.

TOPP, G. C.; FERRÉ, P. A. The soil solution phase. In: DANE, J.H. & TOPP, G.C., eds. **Methods of soil analysis**. Wisconsin, Soil Science Society of America, 2002. p.417-1071.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v. 16, n. 3, p. 576-583, 1980.

WHALLEY, W. R. Considerations on the use of time domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content. **European Journal of Soil Science**, v.44, n.1, p.1-9, 1993.