AVALIAÇÃO DAS MEDIÇÕES DE UMIDADE UTILIZANDO SONDA DE REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO (TDR) COM TUBOS DE ACESSO EM MATERIAL PADRÃO E ALTERNATIVO

Elis Rejane Freire[1];Andréia de Almeida[2] & Sérgio Koide[3]

RESUMO – Algumas sondas de reflectometria no domínio do tempo (TDR) podem fornecer dados de umidade em diferentes profundidades do solo, posicionando a sonda através de tubos de acesso instalados em campo. Contudo, custo e tempo de importação dos tubos de acesso padrão, normalmente constituídos de policarbonato, podem comprometer a aquisição de dados. Diante dessa limitação e da importância dos dados de umidade do solo, o objetivo deste trabalho foi avaliar, em laboratório, a acurácia de um sensor TDR, modelo Trime Pico IPH/T3-44, além de verificar a possibilidade de substituição dos tubos de acesso padrão (policarbonato do tipo TECANAT) por tubos de PVC comercial. Os resultados indicaram funcionamento adequado da sonda TDR. Os dados de umidade obtidos no ar foram equivalentes entre as medições sem tubo de acesso, com tubo padrão e com tubo alternativo. Com relação às medidas obtidas no recipiente preenchido com água destilada, foram observados valores de umidade variando entre 0.42 m³/m³ (PVC) e 0.97 m³/m³ (tubo padrão). Apesar das medições subestimadas de umidade, dados obtidos indicam o potencial de utilização do tubo de PVC, desde que se realize a devida calibração da interferência do PVC no sinal da sonda.

ABSTRACT– Some domain reflectometry probes (TDR) can provide moisture data at different depths of the soil by positioning the probe through access tubes installed in the field. However, the cost and time to import standard access tubes, usually made of polycarbonate, can compromise data acquisition. In view of this limitation and the importance of soil moisture data, the objective of this study was to evaluate, in laboratory, the accuracy of a TDR sensor, model Trime Pico IPH / T3-44, in addition to checking the possibility of replacing the standard access tubes (TECANAT type polycarbonate) by commercial PVC pipes. The results indicated proper functioning of the TDR probe. The humidity data obtained in the air (less than 0.00001 m³/m³) were equivalent between measurements without access tube, with standard tube and with alternative tube. Regarding the measurements obtained in the container filled with distilled water, values of humidity ranging between 0.42 m³/m³ (PVC) and 0.97 m³/m³ (standard tube) were observed. Despite the underestimated humidity measurements, data obtained indicate the potential use of PVC pipes, provided that proper calibration of PVC interference on the probe signal.

Palavras-Chave – Permissividade, PVC.

[1]) Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte - DF, 70910-900, (61) 3107-5531, elisrejanef@gmail.com
[2]) Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte - DF, 70910-900, (61) 3107-0937, andreiaalmeida.df@gmail.com
[3]) Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte – DF, 70910-900, (61) 3107-0937, skoide@unb.br

1. INTRODUÇÃO

Umidade do solo, segundo Kirkham (2005), refere-se à quantidade de água armazenada na zona não saturada do solo sob influência de fatores climáticos, topográficos, pedológicos e de cobertura do solo. Além de auxiliar na nutrição das plantas e microrganismos do solo; a umidade tem papel fundamental na agricultura (Lima,2008). Somado a isso, a umidade é um parâmetro importante no balanço hídrico terrestre e em análises de estabilidade em obras de engenharia (Lekshmi*et al.*, 2014). Em função de sua aplicabilidade em estudos climáticos, hidrológicos e agrícolas, a umidade do solo é uma importante variável do ciclo hidrológico a ser monitorada.

Existem diferentes métodos para medição do teor de umidade do solo. Pelo método padrão, denominado método gravimétrico, a umidade é obtida como a diferença entre as massas úmida e seca de amostras de solo (Lekshmi*et al.*,2014). O processo de secagem das amostras é realizado em estufa, com temperatura entre 60 e 110°C entre 24 e 48 horas, ou até que se obtenha massa constante nas amostras secas. Apesar de fornecer dados diretos de umidade, o método gravimétrico não é prático levando em consideração a necessidade de obtenção de um número elevado de amostras. Desse modo, métodos indiretos, a exemplo das sondas de reflectometria no domínio do tempo (TDR), têm sido amplamente difundidos (Topp e Davis,1985; Petersen,1995).

Na reflectometria no domínio do tempo (*TDR*) o parâmetro de interesse é a constante dielétrica, também denominada permissividade relativa aparente ($\boldsymbol{\varepsilon_a}$)(White e Zegelin, 2000). Esta variável permite caracterizar a resposta de determinado material quando submetido a um campo eletromagnético. No caso das sondas TDR, um pulso de tensão gera um campo que é propagado no solo e retorna ao receptor contido na sonda, que então, mede o tempo (*t*) decorrido entre a propagação e a reflexão do campo (Hillel, 2011).

Conhecendo-se o tempo (*t*) de propagação das ondas eletromagnéticas, com frequência entre 1 *MHz* a 1 *GHz* e velocidade de 3,0 x $10^8 ms^{-1}$ (*c*), ao longo de uma haste metálica de comprimento conhecido (*L*), é possível estimar a permissividade relativa aparente (Equação 1) (White e Zegelin, 2000; Kaiser *et al.*,2010). Como $\boldsymbol{\varepsilon_a}$ da água é cerca de 200% maior que a do solo e do ar (81, 4, e 1, respectivamente), a presença de umidade no solo altera sensivelmente $\boldsymbol{\varepsilon_a}$, possibilitando que a referida grandeza possa ser utilizada como medida indireta do teor de umidade (White e Zegelin, 2000).

$$\varepsilon_a = \left(\frac{ct}{2L}\right)^2 \qquad (1)$$

Equipamentos TDR são vantajosos por permitirem a aquisição de dados de modo automatizado e menos invasivo, diferentemente do método gravimétrico, e por não representar risco à saúde do operador, como ocorre com as sondas de nêutrons que necessitam de fontes radioativas (Andrade *et al.*, 1998; Topp*et al.*, 1980). No caso dos sensores TDR utilizados em perfilagem da umidade, isto é, que fornecem dados de umidade em diferentes profundidades, tubos de acesso são necessários para revestir os furos e garantir o contato adequado da sonda com o solo. A utilização desses tubos, apesar de favorecer o conhecimento da distribuição vertical de umidade do solo, acarreta custo e trabalho adicionais.

Em geral, tubos de acesso padrão, fornecidos pelo fabricante de equipamentos TDR, são constituídos de policarbonato. Por não serem produzidos no mercado nacional, o valor e o tempo médio para importação desses tubos são elevados. Resende *et al.* (2017) obtiveram resultados satisfatórios ao substituir tubos de acesso padrão importados por tubos fabricados em PVC no mercado nacional, porém utilizando sensores de reflectometria no domínio da frequência (Frequency Domain Reflectometry - FDR). Para equipamentos TDR, Laurent *et al.* (2001) afirmam que o PVC tem sido testado com sucesso.

Diante desse cenário, pretende-se, com este trabalho, avaliar em laboratório a acurácia deum sensor TDR, modelo Trime Pico IPH/T3-44, em medições de umidade, além de avaliar a possibilidade de substituição dos tubos de acesso padrão (policarbonato do tipo TECANAT) por tubos comerciais de PVC.

2. METODOLOGIA

Medir a umidade do solo em campo utilizando sonda TDR, como o modelo Trime Pico IPH/T3-44 adotado neste estudo, requer a avaliação prévia da acurácia do equipamento em laboratório. Essa avaliação consiste em obter dados de permissividade relativa aparente (ε_a) em meios homogêneos nos quais seu valor seja conhecido. Para o ar e a água destilada, por exemplo, são reportados na literatura valores de$\varepsilon_a = 1$ e $\varepsilon_a = 69\ a\ 81$, respectivamente. É importante ressaltar que os valores de ε_a são determinados por meio da Equação2, utilizando dados de tempo de propagação do campo eletromagnético (*tp*), obtidos com a sonda TDR, em picossegundos.

$$\varepsilon_a = \exp\left(0.00478 t_p + 0.34928\right) \qquad (2)$$

A partir dessas informações, o equipamento foi testado em ar, água destilada e, posteriormente, água destilada acrescida de cloreto de sódio (NaCl) (Figura 1). O objetivo de realizar medições sob diferentes concentrações de NaCl, além da avaliação do desempenho da sonda na medição da condutividade elétrica, foi verificar se variações na condutividade do meio interferem nas medições de umidade.

Inicialmente, a sonda foi testada no ar, sem a utilização dos tubos de acesso. Em seguida, foram feitos três conjunto de testes no ar alternando os tubos de PVC e TECANAT, com 30 medições consecutivas para cada tipo de tubo (Figura 1). Para teste em água, foi utilizado um recipiente cilíndrico com 60 cm de diâmetro e 30 cm de altura, preenchido com 105 litros de água destilada (condutividade elétrica = 0,00327 dS/m e sólidos dissolvidos = 0,0012 g/L). Nesse meio, foram realizados três conjuntos de medição com trinta repetições para cada um dos tubos posicionados no centro do recipiente, com o intuito de remover interferências da borda na leitura.

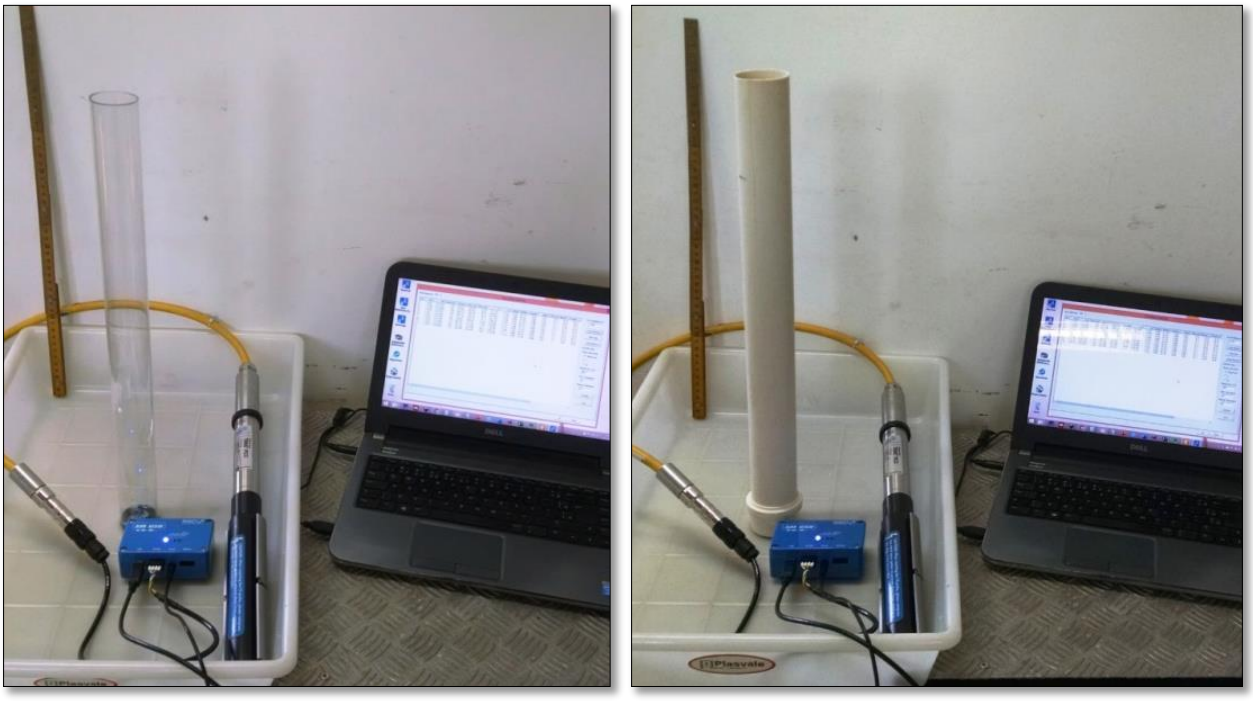

Figura 1 –Avaliação da acurácia da sonda, TDR Trime Pico IPH/T3-44, utilizando tubo de acesso padrão, em Tecanat (Imagem à esquerda), e PVC (Imagens à direita), no ar.

Além disso, foram obtidas cinco medidas de permissividade em nove pontos dispostos desde a borda até o centro do recipiente com o intuito de verificar como a propagação do sinal da sonda pode ser influenciado pelo recipiente de teste. Por fim, medidas foram obtidas em água destilada acrescida de NaCl, sob as seguintes concentrações de sólidos dissolvidos: 0,13; 0,285; 0,513; 0,784; 2,73 e 5,14 g/L (Figura 2).

Esses intervalos foram definidos considerando recomendações do fabricante, que classifica variações de baixa (inferior à 1g/L de sólidos dissolvidos) a elevada salinidade (superior à 5g/L de sólidos dissolvidos), além dos trabalhos realizados por Dettman e Bettman (2018); Agah *et al.* (2019). A cada etapa de diluição de NaCl, três conjuntos de medição, com dez repetições cada, foram realizados para cada tubo. Simultaneamente, medidas de condutividade elétrica, sólidos dissolvidos e temperatura da água foram obtidas por meio de sensor de bancada visando calibração entre diferentes equipamentos.

Figura 2 – Avaliação da acurácia da sonda, em diferentes posições do recipiente (Imagem à esquerda), teste com diferentes concentrações de NaCl, em tubo padrão Tecanat (Imagem do meio) e tubo alternativo em PVC (Imagem à direita), na água.

Os testes resultaram em dados de tp (picossegundos), temperatura (°C) e condutividade elétrica (dS/m). A conversão dos dados de tp para permissividade relativa aparente (ε_a) e, posteriormente, de ε_a para umidade do solo foi realizada automaticamente pela sonda. No caso da umidade do solo (%vol) aplicou-se a equação de Topp (1980) (Equação 3) para conversão dos dados de $\varepsilon_a$em umidade. Posteriormente, os dados obtidos foram analisados por meio de estatística descritiva e análise de correlação entre as medidas obtidas nos tubos de acesso padrão e em PVC.

$$\theta_{v} = 7{,}16 \times 10^{-12} r_a^{5} - 1{,}36 \times 10^{-8} r_a^{4} + 9{,}81 \times 10^{-5} r_a^{3} - 3{,}20 \times 10^{-3} r_a^{2} + 5{,}26 \times 10^{-1} r_a - 3{,}01 \times 10 \qquad (3)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultado para avaliação da acurácia das medições obtidas com a sonda TDR, por meio da análise em laboratório, foram obtidos dados de umidade no ar e sob saturação com água, para os tubos de acesso padrão e alternativo. Os dados de umidade obtidos no ar foram equivalentes entre as medições sem tubo de acesso, com tubo padrão, em policarbonato, e com tubo alternativo, em PVC (Tabela 1). Neste caso, o volume de umidade foi inferior a 0,001%, indicando valores de permissividade relativa aparente menores ou iguais a 1, conforme previsto na literatura. Com relação às medidas obtidas no recipiente preenchido com água destilada, foram observados valores de permissividade variando entre 40 (PVC) e 80 (tubo padrão).

Tabela 1 - Média ±desvio padrão dos dados obtidos no ar e na água destilada com tubos de acesso padrão (Tecanat) e alternativo (PVC).

Meio	Tubo	tp (picossegundos)	Temperatura (°C)	Umidade(%vol)	Condutividade (dS/m)
Ar	Sem tubo	-28,862 ± 0,103	33,05 ± 0,10	0,001 ± 0,000	1,110 ± 0,002
	Tubo padrão (tecanat)	-313,414 ± 27,522	32,05 ± 0,70	0,001 ± 0,000	2,717 ± 0,952
	Tubo alternativo (PVC)	-1,042 ± 4,945	32,70 ± 0,45	0,001 ± 0,000	0,948 ± 0,134
Água destilada	Tubo padrão (tecanat)	743,378 ± 111,222	32,75 ± 0,15	96,941 ± 10,395	1,942 ± 0,193
	Tubo alternativo (PVC)	611,947 ± 21,863	30,35 ± 0,70	42,314 ± 3,831	1,030 ± 0,220

É importante destacar que valores elevados de ε_a estão associados com elevado tempo de propagação do campo eletromagnético (tp) em um dado meio, conforme observado na Figura 3a, e isso se deve principalmente ao elevado conteúdo de umidade que facilita a propagação do campo eletromagnético.Desse modo, para o tubo de Tecanat, a umidade média estimada a partir dos valores de *tp* foi superior a 96%vol, indicando saturação esperada para o recipiente preenchido com água destilada.

Para o tubo de PVC, a umidade do recipiente preenchido com água destilada foi subestimada em comparação com tubo padrão, com média inferior a 43%vol (Tabela 1 e Figura 3a). Foi possível observar que há uma tendência linear diretamente proporcional entre as leituras de tp com os dois tubos (Figura 3b). Contudo, essa relação não demonstrou significância ($R^2<0.5$). É possível que diferenças quanto ao diâmetro e a espessura da parede do tubo, bem como a resistência elétrica natural do PVC tenham ocasionado interferência nas leituras.

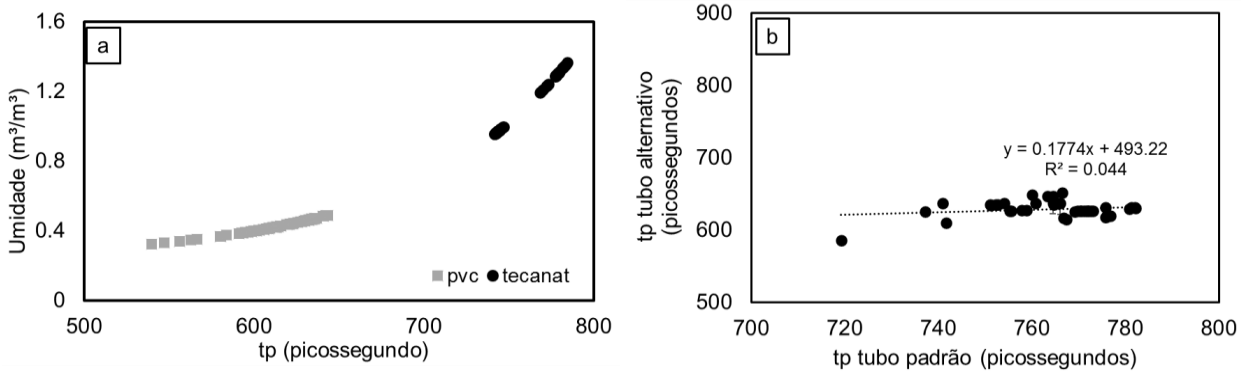

Figura 3 - a) Umidade em função de tp para tubos de acesso padrão e alternativo. b) Relação entre dados de tp obtidos por meio dos dois tubos de acesso.

Além disso, alterações também foram observadas nos dados de temperatura e condutividade elétrica, com média de 30,3°C e 1,03dS/m para tubo em PVC e média de 32,5°C e 1,92dS/m para tubo padrão em Tecanat, respectivamente. Quanto ao efeito de borda do recipiente utilizado na avaliação da acurácia do equipamento TDR, não foram observadas variações significativas entre as leituras realizadas no ponto central (9) e aqueles dispostos nas proximidades da borda (pontos 1, 2, 3 e 4), independente do tubo testado (Figura 3).

Por fim, com relação à condutividade elétrica, o equipamento apresentou sensibilidade ao acréscimo gradual de cloreto de sódio na água destilada (Figura 4). Houve, para ambos os tubos, uma relação direta entre as medidas de condutividade obtidas com a sonda TRIME tanto em função das variações de NaCl (Figuras 4a e 4b) quanto em relação às medidas obtidas com sensor de condutividade utilizado no laboratório (Figura 4c).

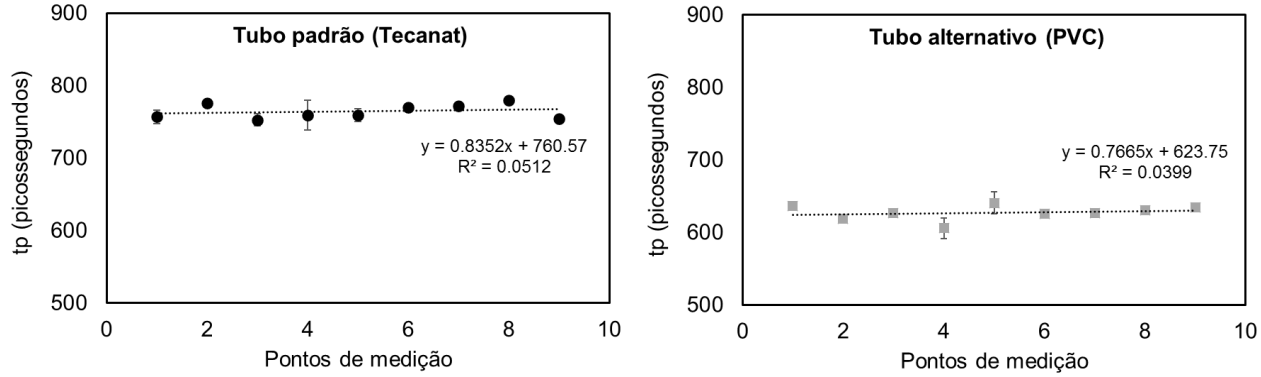

Figura 4 - Valores médios de tp nos tubos de acesso padrão e alternativo em diferentes pontos no interior do recipiente com água destilada, desde a borda (pontos 1, 2, 3 e 4), passando por pontos intermediários (pontos 5, 6, 7 e 8) até o centro (ponto 9). Barras de erro são indicativas do desvio padrão das medidas de tp para cada ponto.

Contudo, essa relação demonstrou-se significativa para os dados obtidos por meio do tubo PVC (R^2>0.5), possivelmente devido ao maior tempo de estabilização da solução de NaCl no recipiente de teste. Após diluição do NaCl, homogeneização e estabilização na água destilada, leituras foram adquiridas inicialmente com tubo de Tecanat e, em seguida, com tubo de PVC. Considerando um volume de 100L de água, é possível que o tempo de aproximadamente 10 minutos para homogeneização da solução com o meio não foi suficiente, fornecendo medidas mais representativas nas leituras com PVC.

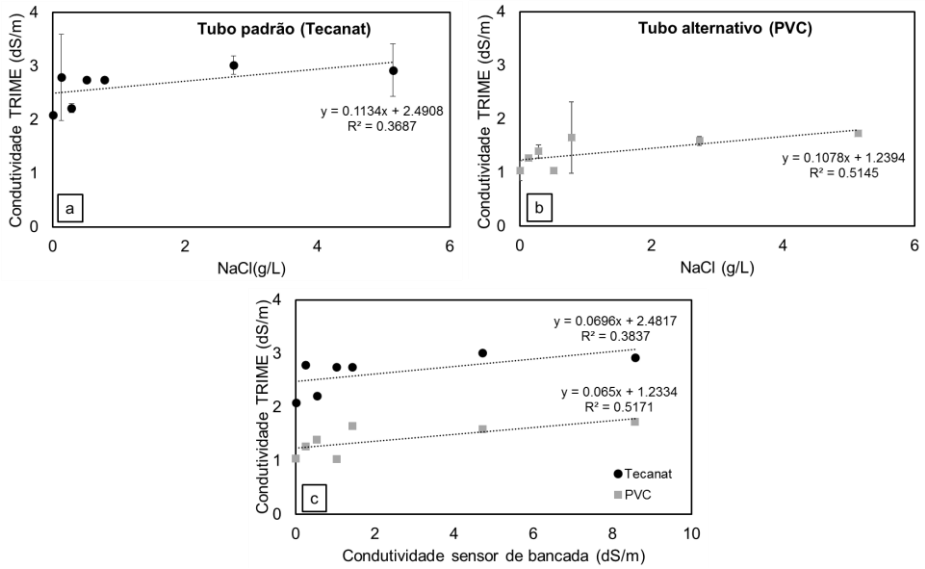

Figura 5 - Condutividade elétrica da água (dS/m) para os tubos (a) padrão e (b) alternativo, obtidos com a sonda TRIME sob diferentes concentrações de NaCl. Barras de erro são indicativas do desvio padrão das medidas de condutividade para cada concentração de NaCl.10c) Comparação entre dados de condutividade elétrica obtidos com a sonda TRIME e o sensor de condutividade elétrica de bancada.

4. CONCLUSÃO

Conclui-se, com os resultados prévios obtidos em laboratório, que o equipamento testado, a sonda TDR Trime Pico IPH/T3-44, está funcionando adequadamente, uma vez que, apresentou valores de ε_a compatíveis com aqueles apresentados na literatura, especialmente com a utilização do tubo padrão. Apesar das medições subestimadas de umidade, dados obtidos apontam potencial de utilização do tubo de PVC, desde que se realize a calibração da interferência do PVC no sinal da sonda. Discrepâncias nas leituras entre os tubos padrão e alternativo serão avaliadas de modo mais aprofundado nas etapas seguintes do trabalho, visto que este projeto encontra-se em andamento. A etapa atual do projeto consiste na coleta de dados em campo com o objetivo de avaliar as diferenças na umidade do solo em função de suas características pedológicas e de cobertura do solo.

REFERÊNCIAS

AGAH, A.E.; MEIRE, P.; DECKERE, DE E. (2019). "Laboratory Calibrationof TDR Probes for Simultaneous of Measurements Soil Water Content and Electrical Conductivity" *Communications in Soil Science and Plant Analysis Department of Soil and Water Engineering*, v. 50, n. 13, pp. 1525-1540.

ANDRADE, C.L.T. *et al.* (1998). "*Parâmetros de solo - água para a engenharia de irrigação e ambiental".* In Anais do 27 Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Poços de Caldas, UFLA/SBEA, Ago.1998.

DETTMAN, U.; BECHTOLD, M. (2018). "*Evaluating commercial moisture probes in reference solutions covering mineral to peat soil conditions"*. Vadose Zone Journal, pp.7.

HILLEL, D. (2011) "*Environmental soil physics"*. Academic press, San Diego - USA.

KIRKHAM, M.B. "*Principles of soil and plant water relations"*. Oxford UK: Editora Elsevier academic press, 2005.

LACERDA, M. P. C., *et al.* (2007). "*Utilização de sensoriamento remoto parao estabelecimento de relações entre vegetação nativa e classes de solos em mapeamento pedológico"*. Distrito Federal. Brasília: UNB/FAV.

LAURENT, J.P., *et al.* (2001)."*On the use of the TDR trime-tube system for profiling water content in soils*. TDR'2001, Evanston-Illinois, USA, pp. 5-7.

LEKSHMI,S.U.,*etal* .(2014). "*A critical review ofsoilmoisturemeasurement*". v. 54, pp. 92-105.

LIMA, W.P. (2008). "*Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas*."2ª ed. USP Piracicaba - SP.

PETERSEN, L. W., *et al*. (1995). "*High- resolution time domain reflectometry: Sensitivity dependency on probe-design*". *SoilSci*. 159, pp. 149-154.

RESENDE, R.S., *et al.* (2017). *"Calibração do sensor de capacitância Diviner 2000utilizando tubos de acesso padrão e alternativo". RevistaBrasileiradeAgriculturaIrrigada*, v.11(5).

TOPP, C. *et al.* (1980). *"Electromagnetic Determination of Soil Water Content:Measurements in Coaxial Transmission Lines". Water Resour. Res*., 16(3).

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L. (1985). *"Time-domain reflectometry (TDR) and its application to irrigation scheduling"*. In: Hillel, D., ed., "Advances in Irrigation," Vol. 3. Academic Press, San Diego.

WHITE, I.; ZEGELIN, S.J. (2000). "*Electric and Dielectric Methods for Monitoring Soil-Water Content"*. In: Wilson, L.G.; Everett, L.G.; Cullen, S.J. Handbook of Vadose Zone Characterization e Monitoring. EUA: Lewis Publishers. pp. 730.

KAISER, D.R.,et al. (2010). "Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern" Brazil. R. Bras. Ci. Solo, v. 34, pp. 649-658.