Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

Ajuste de modelo para determinar a umidade em Neossolo Flúvico com uso de uma sonda *Time Domain Reflectometry* (TDR)

Adjustment model to determine the soil moisture in Fluvic Neosol using a Time Domain Reflectometry (TDR) probe

Thayslan Renato Anchiêta de Carvalho[1], Wendel de Melo Massaranduba[2], Sávio de Brito Fontenele[1], Rafael Bezerra Tavares Vasques Landim[1], Luiz Alberto Ribeiro Mendonça[3]

[1] Universidade Federal do Ceará, (UFC), Campus Pici, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Boco 804, CEP 60.455-760, Fortaleza, CE. E-mail: t_sren@hotmail.com
[2] Universidade Federal do Cariri (UFCa), Campus Crato, Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade, Curso de Agronomia, Crato, CE.
[3] Universidade Federal do Cariri (UFCa), Campus Juazeiro do Norte, Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade, Juazeiro do Norte, CE.

Recebido em: 06/01/2014 Aceito em: 22/07/2014

Resumo. Objetivou-se ajustar equação de correção para os dados de umidade monitorados por um TDR (*Time Domain Reflectometry*), para um solo do tipo Neossolo Flúvico, localizado na região sul cearense, semiárido do nordeste brasileiro, avaliando a influência da temperatura na estimativa do conteúdo de água pelo equipamento TDR e o ajuste de uma equação para diferentes tipos de solos. Essa avaliação foi feita por meio dos parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação (R^2) e índices de concordância (d) e de confiança (C) de Willmont. Os resultados mostraram que (i) as medidas de umidade estimadas pelo TDR foram pouco sensíveis a variações de temperatura; (ii) o ajuste de uma equação para diferentes tipos de solos apresentou baixa precisão na estimativa das umidades, com R^2 de 0,49, de 0,76 e C de 0,56; (iii) o ajuste da equação para o mesmo tipo de solo (Neossolo Flúvico) apresentou forte correlação com R^2 de 0,98 e ótimo desempenho com C de 0,98 e d de 0,99. Esses resultados indicam que a equação de correção dos dados de umidade monitorados pelo TDR deve ser ajustada para cada tipo de solo, possibilitando obter valores coerentes para conteúdo de água no solo e confirmando a necessidade de calibração.

Palavras-chave: tipos de solos, temperatura do solo, umidade do solo

Abstract. This study aimed to to set a correction equation to correct the soil moisture data monitored by a TDR for a soil type Fluvic Neosol, located in the Southern region of Ceará, semiarid region of northeastern Brazil, to evaluate the influence of temperature on the estimated soil water content by TDR equipment and setting an equation for different soil types. This evaluation was done by means of statistical parameters: coefficient of determination (R^2) and index of agreement (*d*) and confidence (C) and Willmont. The results showed that (i) moisture measures estimated by TDR were less sensitive to temperature variations, (ii) the adjustment of a single equation for different soil types showed low accuracy in the estimation of moisture, with R^2 of 0.49, d 0.76 and C 0.56 (poor performance), (iii) the fit of the equation for the same soil type (Fluvic Neosol) showed a strong correlation with R^2 of 0.98 and optimum performance with C 0.98 and d 0.99. These results indicate that the correction equation of soil moisture data monitored by TDR should be adjusted for each soil type, providing to obtain consistent values for soil water content and confirming the need for calibration.

Keywords: soil types, soil temperature, soil water content

Introdução

A crescente demanda de recursos hídricos para diversos fins bem como a sua degradação provocam a busca de um manejo racional da água, visando garantir a integridade e a sustentabilidade do meio ambiente, promovendo a produtividade dos sistemas agrícolas (Souza et al., 2006).

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

Estudos de manejo de recursos hídricos analisam diversas variáveis dentro do sistema solo-água-planta-atmosfera. Dentre essas variáveis, a umidade do solo constitui-se uma delas, pois a quantificação da disponibilidade de água no solo é indispensável na otimização da produtividade das colheitas, na geração de escoamento superficial e controle de enchentes e no monitoramento hidrossedimentológico (Cecílio & Santos, 2009; Lopes et al., 2010).

Um método de quantificação ideal da água no solo deve basear-se numa propriedade física dependente apenas do conteúdo de água (Lacerda et al., 2005). Atualmente, a técnica *TDR (Time Domain Reflectometry)* vem sendo muito utilizada para esse fim (Lopes et al., 2010).

O princípio de funcionamento da técnica *TDR* baseia-se no tempo de percurso de um pulso eletromagnético entre as hastes de uma sonda inserida no solo, o qual é dependente da constante dielétrica média do meio (média ponderada das constantes dielétricas das frações das fases sólida, líquida e gasosa) (Santos et al., 2012). Como a água tem constante dielétrica de 81, número superior à dos materiais do solo que ficam em torno de 3 e do ar, cujo valor é 1, uma pequena variação no conteúdo de água implicará em uma elevação da constante dielétrica média do meio, e consequentemente no tempo de deslocamento do pulso (Tomaselli & Bacchi, 2001).

O desempenho e a funcionalidade da TDR demonstraram aplicabilidade no monitoramento da umidade do solo (Lopes et al., 2010). Todavia, vários fatores como a topografia, propriedades do solo, tipo e densidade da vegetação, matéria orgânica, profundidade do lençol freático, precipitação e radiação solar influem na sua variabilidade (Santos et al. 2011). Estudos realizados no território brasileiro demonstram que as equações recomendadas pela *Campbell Scientific®,* fabricante da *TDR,* não são adequadas para alguns tipos de solos. Assim, surge a necessidade de ajuste de equações para cada tipo de solo (Lopes et al., 2010).

Nesse contexto, o objetivo do presente estudo foi ajustar uma equação para correção dos dados de umidade obtidos a partir de um equipamento *TDR*, modelo *CS620*, da marca *Campbell Scientific®*, avaliando a influência da temperatura nas estimativas, para um solo do tipo Neossolo Flúvico, localizado na região sul cearense, semiárido do nordeste brasileiro. O ajuste de uma equação para diferentes tipos de solos também foi objetivo desse trabalho.

Material e Métodos

Descrição da área de estudo

O Neossolo Flúvico estudado localiza-se na Microbacia Hidrográfica do São José – MHSJ, ocupando 22% da área total da mesma, que é de aproximadamente 41 km². Esta microbacia está localizada na Região Metropolitana do Cariri, inserida na Sub-bacia do Salgado, um dos principais afluentes do rio Jaguaribe, o maior rio do Estado do Ceará, Brasil (Fontenele, 2010) (Figura 1).

Equipamento utilizado

O *TDR* utilizado foi o modelo CS620, fabricado pela *Campbell Scientific®,* constituído de uma sonda com duas hastes de aço inoxidável de 0,12m de comprimento, acoplada a um *display* CD620 do mesmo fabricante.

Método de ajuste das equações

Foram coletadas quatro amostras de solos, inserindo os cilindros na vertical de forma a acondicionar um volume de 1,13 x 10^{-3} m^3. Esses cilindros possuíam uma altura de 0,15 m. As coletas foram realizadas no entorno da estação de monitoramento de umidade do solo da MHSJ (Lat.: 460205,51; Long.: 9200620,64; Alt.: 388,71m, Sistema UTM-WGS84). As características médias do solo da referida estação estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1. Características médias do Neossolo Flúvico na MHSJ.

Textura do solo	Areia grossa (%)	Areia fina (%)	Argila (%)	Silte (%)	Matéria orgânica (g kg^{-1})	Densidade do solo (g cm^{-3})
Franco arenoso	41,00	32,00	10,00	0,17	8,45	2,56

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

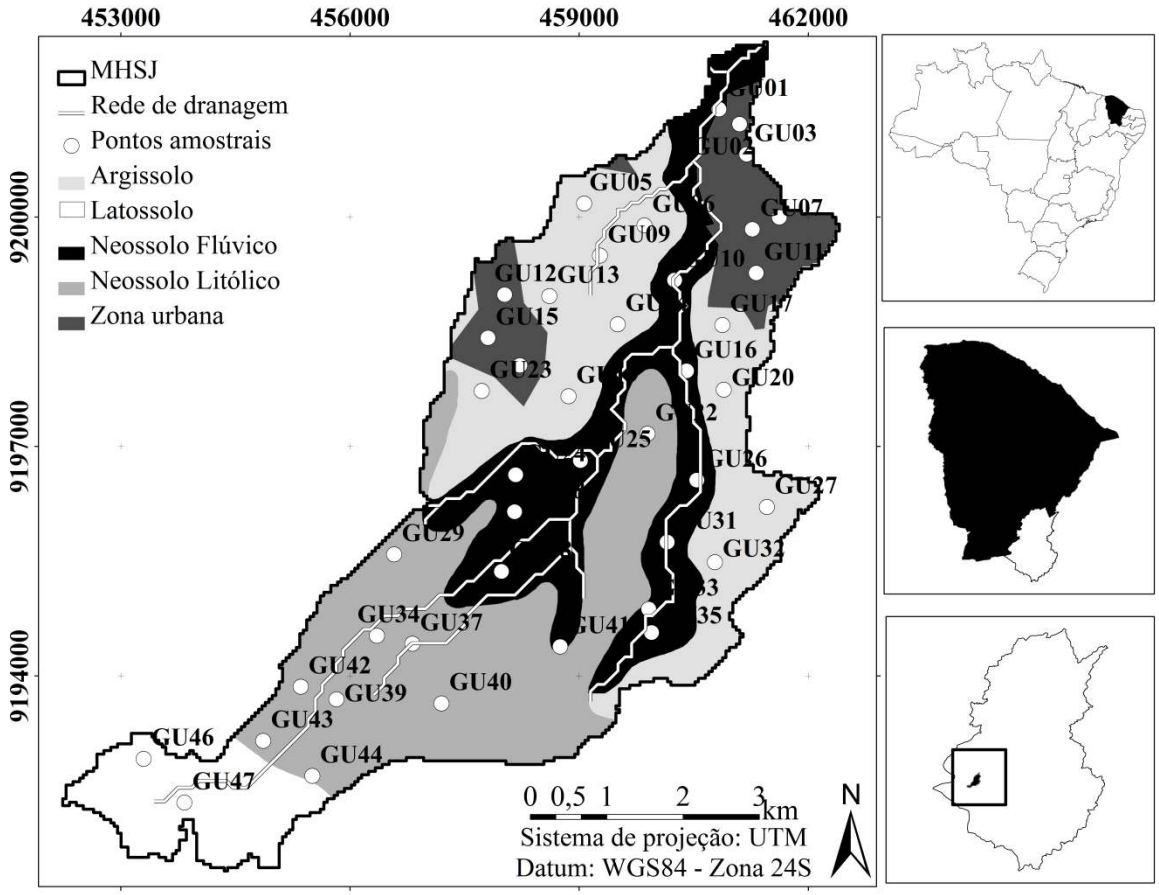


Figura 1. Localização e manchas de solo da Microbacia hidrográfica do São José.

As amostras coletadas tiveram a face inferior envolvida por um tecido preso por um elástico, evitando perda de solo e permitindo passagem de água. Posteriormente, as amostras foram submetidas à saturação em uma bandeja com água a dois terços da altura dos cilindros (0,10m), permanecendo por 24 horas. Em seguida, os cilindros foram retirados da bandeja e alocados sobre uma tela fina para drenagem do excesso de água. Após dois minutos, o tecido da face inferior dos cilindros foi substituído por papel alumínio, para permitir a introdução das amostras na estufa a 105°C. Este método foi adaptado do método proposto por (Kiehl, 1979) para determinação da umidade do solo. Após a preparação das amostras, obteve-se a umidade por meio do método gravimétrico e da técnica *TDR*.

O método gravimétrico consiste na pesagem da amostra de solo antes e depois da secagem em estufa, sendo possível calcular a porcentagem de massa de água do solo, de acordo com a Equação 1 (Vielmo, 2008).

$$U = \left(\frac{Pu - Ps}{Ps}\right) x\ 100 \quad (1)$$

em que, *U* é o conteúdo de água no solo (%), *Pu* é a massa da amostra de solo úmida(g) e *Ps* é a massa da amostra de solo seca (g).

O método TDR consiste em introduzir as hastes metálicas de 0,12m do aparelho na amostra. Ao realizar essa introdução, o aparelho informará o valor do conteúdo da água no solo baseado na constante dielétrica do meio. Para evitar à formação de novos espaços vazios e aumento da densidade do solo da amostra a sonda foi sempre inserida no mesmo local da primeira leitura. Pela TDR foram realizadas três leituras e a leitura média foi utilizada.

Inicialmente foram obtidos os valores de umidade para as amostras saturadas pelos dois métodos. Em seguida, as amostras foram levadas à estufa a 105ºC por duas horas. Após retiradas da estufa, obteve-se os valores de umidade pelo método gravimétrico e pelo TDR. Quando as amostras atingiram a temperatura ambiente (aproximadamente 28°C) foram obtidos novos valores de umidade pelos dois métodos. Essas duas medidas foram realizadas com o objetivo de verificar a sensibilidade do *TDR* a grandes variações de temperatura. Essa operação foi repetida até a obtenção da umidade residual de 5%

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

para cada amostra de solo. Nesse contexto, adotou-se um incremento de tempo progressivo de permanência das amostras na estufa, à medida que foram observadas reduções nas variações de umidade (permanência de duas horas durante os três primeiros dias, quatro horas durante o quarto dia, oito horas durante o quinto dia e vinte e quatro horas durante os dois dias seguintes). Assim, obteve-se um amplo número de dados de conteúdo de água no solo obtidos pelos dois métodos.

O ajuste da equação de correção dos dados de umidade monitorados foi feito a partir de correlação linear entre os conteúdos de água no solo, obtidos pelos métodos utilizados. Avaliou-se também o ajuste de uma equação de correlação para cada tipo de solo existente na MHSJ (Figura 1) e uma única equação de correlação para os diferentes tipos de solos dessa microbacia, utilizando a mesma metodologia adotada para o Neossolo Flúvico. Porém, o número de observações utilizado varia para os diferentes tipos de solo.

Os dados de umidade obtidos pelo método gravimétrico para as quatro amostras foram submetidos à análise e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, processados no *software Statistical Package for Social Sciences – SPSS* 16.0.

Para avaliar o desempenho das equações geradas por meio de regressão linear, fez-se uso dos critérios utilizados por Batista et al. (2006), Rodrigues et al. (2007) e Lopes et al. (2010): coeficiente de determinação (R^2), que indica o grau de correlação entre as variáveis; índice de concordância (*d*), proposto por (Willmott, 1981), que indica o grau de precisão da equação de regressão (Equação 2), podendo assumir valores que variam de zero (nenhuma concordância) a um (concordância perfeita); e o índice de confiança do modelo (*C*), obtido pelo produto entre o coeficiente de correlação (R) e o índice d, também podendo assumir valores de zero a um, sendo interpretado como de desempenho ótimo, para $C > 0{,}85$ a péssimo, para $C \leq 0{,}40$, com intervalos de classes intermediárias de *C* interpretadas como muito bom, bom, mediano, sofrível e mau (Camargo & Sentelhas, 1997).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Ei - Mi)^2}{\sum_{i=1}^{n}[(|Ei - m|] + |Mi - m|)^2} \quad (2)$$

Em que, *E* é a umidade estimada pelo TDR, em kg kg^{-1}, *M* é a umidade medida, em kg kg^{-1}, *m* é a média das umidades medidas, em kg kg^{-1} e *n* é o número de medições.

Na análise de desempenho das equações foram usados dados independentes dos utilizados na geração das equações. Um conjunto de dados gerou a equação e outro conjunto de dados foi usado para análise. Essa metodologia é frequentemente utilizada em estudos de calibração de equipamentos (LOPES et al., 2010) para evitar a indução de resultados tendenciosos.

Resultados e Discussão

As médias de umidade do solo das quatro amostras utilizadas nesse estudo foram consideradas semelhantes pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (Tabela 2).

Tabela 2. Estatística descritiva das umidades do solo obtidas nas diferentes amostras utilizadas

Estatística	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Média*	7,61 ± 3,65 a	8,99 ± 3,77 a	8,26 ± 3,89 a	10,09 ± 4,81 a
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00
Máximo	14,82	15,46	16,07	18,49

*Médias seguidas de mesma letra entre as amostras, não diferem pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Os dados de umidade das quatro amostras foram agrupados para avaliação da influência da temperatura (Figura 2). Na Figura 2B estão dispostos os dados com variações de temperatura e na Figura 2A apenas os dados a temperatura ambiente. Esses dados foram usados para geração e avaliação da equação de correlação linear, responsável pela correção dos dados de umidade monitorados pelo TDR.

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

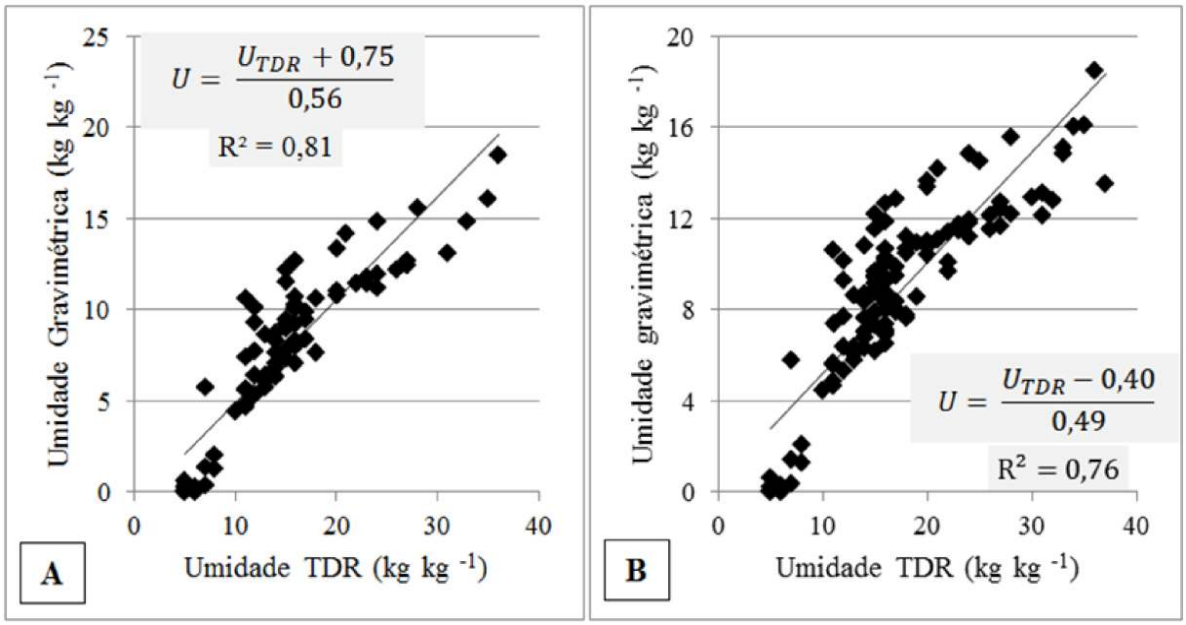


Figura 2. Correlação entre dados de umidade obtidos pelo método gravimétrico e pelo TDR à temperatura ambiente (A) e considerando variações na temperatura das amostras (B).

Os valores de umidade e as equações de correção dos dados das amostras do Neossolo Flúvico, considerando variações de temperatura (Figura 2B) e apenas a temperatura ambiente (Figura 2A), apresentaram diferenças de 5,61%. As medidas obtidas pela técnica *TDR* (Tabela 3) são pouco sensíveis a variação de temperatura, corroborando com os estudos de Topp et al. (1980).

Tabela 3. Análise de desempenho das equações de regressão para as amostras dos Neossolos Flúvicos.

Parâmetro	Amostras com variação de temperatura	Amostras a temperatura ambiente
R²	0,76	0,81
R	0,87	0,90
d	0,94	0,95
C	0,82	0,85
n	98	76

Em que R² é o coeficiente de determinação, *d* é o índice de concordância, *C* é o índice de confiança do modelo, R é o coeficiente de correlação e *n* é o número de dados utilizados.

A equação definida para a correção dos resultados do TDR foi obtida a partir dos valores obtidos à temperatura ambiente, pois apresentaram discreta melhora nos parâmetros da Tabela 2.

Topp et al. (1980) afirmaram que as características do solo como textura, teor de sais e densidade, não afetam a medição da umidade com o TDR, tornando-se desnecessário o ajuste para diferentes tipos de solos. Contudo, estudos realizados no território brasileiro demonstraram que as equações recomendadas pelo fabricante do *TDR,* não são adequadas para alguns tipos solos, necessitando-se de ajustes (Villwock et al., 2004, Medeiros et al., 2007, Lopes et al., 2010 e Santos et al.,, 2010).

Os parâmetros estatísticos obtidos para cada tipo de solo separadamente apresentam melhor correlação (R²), concordância (d) e confiança (C), possibilitando obter pelo TDR valores mais coerentes para conteúdo de água no solo (Tabela 4).

Os baixos valores dos parâmetros estatísticos da análise de desempenho da equação obtida para os diferentes tipos de solos (Tabela 4) podem ser justificados pelas características dos solos. A massa específica é um atributo que pode explicar a necessidade do ajuste de uma equação para cada tipo de solo, pois a mesma conduz a diferenças entre as proporções de espaços vazios no solo (preenchidos por água e ar) e a matriz sólida, variando o valor da constante dielétrica (Trintinalha,

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

2000, Souza et al., 2001, Magalhães et al., 2009, Santos et al., 2010). Outro atributo importante nessa análise, observado por Medeiros et al. (2007), Ponizovsky et al. (1999) e Santos et al. (2010), é o teor de argila do solo, que 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. Já Andrade et al., (2003) e Tommaselli & Bacchi (2001) constataram que os óxidos de ferro e os teores de matéria orgânica também causam influência na leitura da constante dielétrica do solo. Estes funcionam como efeito indireto, ou seja, determinam um aumento da superfície especifica do solo.

Tabela 4. Análise do desempenho das equações de regressão para diferentes tipos de solos da MHSJ.

Tipos de solos	Zona Urbana	Argissolo	Neossolo Flúvico	Neossolo Litólico	Diferentes tipos de solos
R^2	0,77	0,87	0,98	0,95	0,49
R	0,87	0,93	0,98	0,98	0,70
D	0,93	0,96	0,99	0,89	0,79
C	0,81	0,89	0,98	0,87	0,56
n	6	8	9	6	29

Conclusão

As variações de temperatura no solo não influenciam a umidade do solo obtida com uso do TDR.

As equações de correlação das amostras à temperatura ambiente devem ser aplicadas para a correção das estimativas de umidade do solo obtidas com uso do TDR.

A equação gerada para os Neossolos Flúvicos possui confiabilidade e pode ser utilizada para as correções de dados de umidade gerados na MHSJ.

Não é possível o uso de uma única equação de correlação na estimativa da umidade para diferentes tipos de solos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro (processo n° 486767/2012-4) e a UFC (Universidade Federal do Ceará – Campus Cariri) pelo apoio à realização deste estudo.

Referências

ANDRADE, C.L.T.; COSTA, E.L.; ALBUQUERQUE, P.E.P. Desenvolvimento e calibração de guias de onda para TDR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** v.7, n.1, p.173-176, 2003.

BATISTA, T.M.; ANDRADE, E.M.; CRISÓSTOMO, L.A.; MEIRELES, M.; RODRIGUES, J.O. Modelagem da estrutura iônica das águas da bacia hidrográfica do Acaraú, Ceará**. Revista Ciência Agronômica**, v. 37, p. 1-6, 2006.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia,** v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CECÍLIO, R. A.; SANTOS, D. B. Metodologia de calibração de equipamento de TDR para determinação da umidade do solo, **Engenharia Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 524-533, 2009.

FONTENELE, S.B. **Modelagem matemática da dinâmica de fluxo riacho-aquífero na microbacia hidrográfica do riacho São José, região do Cariri cearense,** Fortaleza, Ceará. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal do Ceará, 2010.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia:** relação solo – planta. Ed. Agronômica CERES LTDA. São Paulo, 1979.

LACERDA, R.D.; GUERRA, H.O.C.; BARROS JUNIOR, G.; CAVALCANTI, M.L.F. Avaliação de um TDR para determinação do conteúdo de água do solo. **Revista de Biologia e Ciências da Terra,** v. 5, n. 1, 2005.

LOPES, J.W.B.; COSTA, C.A.G.; PINHEIRO, E. A. R.; TOLEDO, C. E.; ARAÚJO, J.C. Calibração in loco de sensor de umidade do solo sob vegetação de caatinga preservada. In: IX Congreso Latino americano y del Caribe de Ingeniería Agrícola -

XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola -Vitória – ES. **Anais...** 2010.

MAGALHÃES, W.A.; CREMON, C., MAPELI, N.C.; SILVA, W.M., CARVALHO, J.M.; MOTA, M.S., Determinação da resistência do solo a penetração sob diferentes sistemas de cultivo em um Latossolo sob Bioma Pantanal. **Agrarian**, v.2, n.6, p.21-32, 2009.

MEDEIROS, J.D.F.; CATRO, N.; GOLDENFUM, J.A.; CLARKE, R.T. Calibração de Sondas do TDR em um Latossolo, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v.12, n.2, p.19-25, 2007.

PONIZOVSKY, A.A.; CHUDINOVA, S.M.; PACHEPSKY, Y.A. Performance of TDR calibration models as affected by soil texture. **Journal of Hydrology**, v.218, p.35-42, 1999.

RODRIGUES, J.O.; ANDRADE, E.M.; CRISOSTOMO, L.A.; TEIXEIRA, A.S. Modelos da Concentração Iônica em águas subterrâneas no Distrito de Irrigação Baixo Acaraú. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, p. 360-365, 2007.

SANTOS, D.B.; CECÍLIO, R.A.; COELHO, E.F.; BATISTA, R.O.; SILVA, A.J.P. Calibração de TDR: desempenho de alguns métodos e equações de calibração. **Revista Agrarian,** v.5, n.16, p.131-139, 2012.

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** v. 34, p.299-307, 2010.

SANTOS, T.E.M.; MONTENEGRO, A.A.A; SILVA, D.D. Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.15, n.7, p.670–679, 2011.

SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E.; FOLEGATTI, M. V.; COELHO, E.F.; OR, D. Sondas de TDR para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. **Irriga,** v. 11, n. 1, p. 12-25, 2006.

SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E.; TESTEZLAF, R. Experience of the Laboratory of Hydraulics, Irrigation and Drainage of University of Agricultural Engineering/Unicamp in the use of the technique of TDR. In: MATSURA, E.E.; JAVAREZ JUNIOR, A.; GOMES, E.P.; SOUZA, C.F., eds. Applications of the technique of TDR in the Agriculture. Campinas, FEAGRI/UNICAMP,. p.147- 176, 2001.

TOMMASELLI, J.T.G.; BACCHI, O.O.S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 9, p. 1145-54, 2001.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L. ANNAN, A.P. Eletromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**., v.16, p. 574-582, 1980

TRINTINALHA, M.A. **Avaliação da técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) na determinação da umidade em um Nitossolo Vermelho eutroférrico.** Maringá, Paraná, 2000. (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual de Maringá, 2000.

VIELMO, A.L. **Limite superior da retenção da água no solo: método de campo e método de estimativa,** Santa Maria, RS, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.

VILLWOCK, R.; TAVARES, M.H.F.; VILAS BOAS, M.A. Calibração de um equipamento TDR em condições de campo. **Irriga**, v. 9, p. 82-88, 2004.