

Condição de contorno para calibração de reflectômetro usado para medição de água no solo

Boundary conditions for calibration of reflectometer used to measure soil water

Paulo Ivonir Gubiani^{1*} Dalvan José Reinert¹ José Miguel Reichert¹
Neiva Somavila Gelain¹¹

RESUMO

A reflectometria no domínio do tempo (TDR, na sigla em inglês) é uma técnica indireta usada para estimar o conteúdo de água do solo (θ) em função de sua constante dielétrica aparente (K_a). Neste estudo, o objetivo principal foi investigar as consequências de se incluir ou não medidas de K_a em água, na elaboração da curva de calibração do TDR. Foram avaliados horizontes de solo com 0,13kg kg⁻¹, 0,23kg kg⁻¹ e 0,64kg kg⁻¹ de argila. Para cada horizonte, a K_a foi medida em amostras desde solo seco até solo saturado. Adicionalmente, a K_a foi medida apenas em água. As medições foram feitas usando-se cabos coaxiais RGC58, 50Ohm e sensor dupla haste metálica de 19cm. Para cada horizonte, foram formados dois conjuntos de dados com θ e K_a , um com e outro sem as medidas de K_a em água. Em cada conjunto, foi ajustada uma equação polinomial de terceiro grau, estimando θ em função de K_a . Com a inclusão das medidas de K_a em água, o polinômio de terceiro grau se ajustou melhor ao extremo saturado e preveniu erros na estimativa de θ . Como não há garantia de que as medidas de K_a de campo não serão maiores que as medidas de K_a das amostras saturadas em laboratório, recomenda-se a inclusão de medidas de K_a em água para obtenção da curva de calibração. Sem esse procedimento e sem verificação de campo das medidas de K_a , erros na estimativa de θ da ordem de 0,1m³ m⁻³ podem ocorrer facilmente.

Palavras-chave: medição de água no solo, reflectometria, constante dielétrica.

ABSTRACT

The time domain reflectometry is a technique used to estimate soil water content (θ) as a function of its apparent dielectric constant (K_a). In this study the main objective was to investigate the consequences of including or not measures of K_a in water on the TDR calibration curve. Three horizons with different clay content were used: 0.13kg kg⁻¹, 0.23kg kg⁻¹ and 0.64kg kg⁻¹. In each horizon, K_a was measured from dry to saturated soil. Additionally, K_a was

measured in water. Measurements were made using coaxial cables RGC58, 50Ohms and double stainless rod of 19cm. For each soil two data sets with θ and K_a were formed, one with and another without the addition of K_a measured in water. In each set a cubic polynomial equation was adjusted, estimating θ as a function of K_a . With the inclusion of K_a measured in water the cubic polynomial adjusted better the extreme saturated and avoided errors in the estimated θ . Since there is no certainty that the measures of K_a on field will not be greater than the measures of K_a in the saturated samples in the laboratory, it's recommend to include measures of K_a in water to obtain the calibration curve. Without this procedure and no field verification of K_a measurements, errors in estimated θ of the order of 0.1m³ m⁻³ can easily occur.

Key words: measurement of soil water, reflectometry, dielectric constant.

INTRODUÇÃO

O monitoramento do conteúdo de água no solo é necessário em estudos sobre a dinâmica da água no solo e para planejamento do uso racional da água nas atividades agrícolas. Métodos diretos de medição do conteúdo de água por meio da coleta de amostras de solo são laboriosos e destrutivos, o que inviabiliza estudos detalhados sobre a dinâmica da água no solo. Diferentemente, os métodos indiretos não destrutivos são, na maioria, automatizados e fornecem medidas detalhadas do conteúdo de água no solo no espaço e no tempo.

Entre os métodos indiretos, a reflectometria no domínio do tempo (TDR, na sigla em inglês) é um

¹Departamento de Solos, Centro de Ciências Rurais (CCR), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: paulogubiani@gmail.com. *Autor para correspondência.

¹¹Agrosul Assessoria Agronômica, Itaquí, RS, Brasil.

método bastante usado no monitoramento do conteúdo de água no solo. Conforme descrito em JONES et al. (2002), a aplicação dessa técnica em solos baseia-se na mudança da constante dielétrica aparente do solo (K_a), causada pela mudança no conteúdo de água. Essa interferência é capturada pelo TDR por meio de medidas da velocidade de propagação de um pulso elétrico em guias metálicas inseridas no solo, onde a velocidade é inversamente proporcional ao valor de K_a . O valor de K_a de um solo seco fica entre 3 e 5, dependendo de sua composição mineralógica e orgânica, enquanto que a água pura tem valor de K_a em torno de 81.

À medida que aumenta o conteúdo volumétrico de água no solo (θ , $m^3 m^{-3}$), a K_a (adimensional) também aumenta. A relação entre θ e K_a é conhecida como curva de calibração, a qual possibilita estimar θ em função de K_a . Normalmente, os TDR para medição da K_a em solos já fornecem de fábrica uma curva de calibração genérica, a equação proposta por TOPP et al. (1980). Porém, a curva de calibração genérica fornecida pelo fabricante pode não estimar adequadamente o θ (TOMAZELLI & BACCHI, 2001; COELHO et al., 2006; ELAIUY et al. 2009; KAISER et al., 2010; SANTOS et al., 2010).

Em alguns casos, há necessidade ainda de corrigir a calibração obtida em laboratório com medidas posteriores de campo (STANGL et al., 2009), procedimento que pode ser feito individualmente por guia de TDR (SERRARENS et al., 2000). O aumento no comprimento do cabo entre o emissor do pulso elétrico e a guia de medição instalada no campo pode atenuar o sinal refletido e alterar o valor de K_a (COELHO et al., 2005). Assim, a obtenção de curva de calibração específica para cada solo e comprimento de cabo usado no campo é uma prática recomendada para melhorar a acurácia da estimativa de θ .

Para obtenção de uma curva de calibração representativa, a K_a deve ser medida desde solo com mínimo (solo praticamente sem água) até máximo θ (solo saturado). Além disso, a inclusão no conjunto de dados da K_a medida apenas em água fornece uma condição de contorno para o ajuste da equação de calibração que previne erros de estimativa no campo, principalmente para θ próximos da saturação.

Devido à incapacidade de representar toda a variabilidade da estrutura do solo do campo nas amostras usadas para a calibração, a K_a medida em solo saturado no campo pode ser maior que a K_a medida nas amostras de solo saturadas usadas para a calibração. Por isso, é importante garantir que a extrapolação da curva de calibração estime conteúdos de água que sigam uma tendência coerente

em direção à K_a medida apenas em água. Assim, o objetivo deste trabalho é investigar a interferência da inclusão de medidas de K_a em água na curva de calibração do TDR100.

MATERIAL E MÉTODOS

A curva de calibração do TDR100 foi obtida para a camada de solo de 0-0,8m do horizonte A e da camada de 1,5-2,0m do horizonte Bt de um Argissolo, respectivamente, denominados de Argissolo-A (0,13kg kg^{-1} de argila, 0,10kg kg^{-1} de silte e 0,77kg kg^{-1} de areia) e Argissolo-Bt (0,23kg kg^{-1} de argila, 0,13kg kg^{-1} de silte e 0,64kg kg^{-1} de areia) e da camada de 0-0,3m do horizonte A de um Latossolo, denominado de Latossolo-A (0,64kg kg^{-1} de argila, 0,24kg kg^{-1} de silte e 0,12kg kg^{-1} de areia).

Em cada horizonte, aproximadamente 50kg de solo foi coletado, colocado para secar ao ar e passado por peneira de 2mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA). O conteúdo gravimétrico de água da TFSA foi quantificado em estufa a 105°C por 24 horas. Na sequência, quatro amostras de 3,5kg da TFSA foram colocadas na estufa a 105°C. A mudança de massa dessas amostras foi monitorada ao longo do tempo, a fim de se obter amostras com conteúdos de água diferentes entre si e menores que o conteúdo de água da TFSA. Em várias outras amostras de 3,5kg da TFSA, água foi adicionada de modo a aumentar gradativamente o seu conteúdo até a condição de umidade que ainda possibilitava a homogeneização da amostra. Devido ao aumento da retenção de água com o aumento no teor de argila, o número de amostras foi crescente na sequência Argissolo-A (10 amostras), Argissolo-B (11 amostras) e Latossolo-A (15 amostras), a fim de se manter um intervalo de aproximadamente 0,05m³ m⁻³ entre uma amostra e outra.

As amostras foram transferidas para colunas de PVC, com diâmetro de 10cm e altura de 30cm. A quantidade de solo transferida e acondicionada nas colunas de PVC (em camadas de 2cm de espessura) foi calculada para que as amostras ficassem com densidade mais próxima da densidade de campo (1590kg m⁻³ para o Argissolo-A, 1555kg m⁻³ para o Argissolo-Bt e 1300kg m⁻³ para o Latossolo-A). Também foi preparada uma amostra de solo saturado numa coluna de PVC e outra coluna de PVC contendo apenas água.

No centro de cada coluna de PVC foi inserida verticalmente uma sonda de TDR, construída com duas hastes de aço inoxidável de 0,5cm de diâmetro e 19cm de comprimento. O corpo de fixação

da sonda foi construído de resina epóxi, que manteve o paralelismo das guias espaçadas 4,5cm.

A constante dielétrica das amostras foi medida com diferentes comprimentos de cabo. Para o Argissolo, foi usado cabo coaxial RGC58, 500Ohm, com comprimento de 3, 10 e 25m. Para o Latossolo, foi usado apenas o cabo de 3m, porque não se tinha evidências de efeito do comprimento do cabo e porque a calibração para o Latossolo foi feita em período anterior ao da calibração para o Argissolo. Após indícios de campo, com o uso da curva de calibração do Latossolo, de que poderia haver efeito do comprimento do cabo, optou-se por investigar esse fator no Argissolo.

As sondas foram conectadas a um multiplexador SDMX50, ligado ao TDR100, e este a um datalogger CR10X para o armazenamento dos dados (Campbell Scientific, Inc.). Em cada amostra, a constante dielétrica (K_a , adimensional) foi medida no mínimo cinco vezes. O conteúdo de água de cada amostra foi expresso em base volumétrica (θ , $m^3 m^{-3}$). Aos dados medidos foi ajustado o modelopolinomial de terceiro grau: $\theta = a + bK_a + cK_a^2 + dK_a^3$ (1) em que a, b, c e d são os parâmetros de ajuste do modelo, respectivamente, para o termo constante, de primeiro, segundo e terceiro grau.

A equação (1) foi ajustada com e sem as medidas de K_a feitas em água, por análise de regressão, e a significância dos parâmetros do modelo foi avaliada pelo teste t a 5%. As equações de calibração obtidas foram comparadas com a equação polinomial

de terceiro grau obtida por TOPP et al. (1980), na qual o valor dos parâmetros são: $a = -5,3 \cdot 10^{-2}$; $b = 2,92 \cdot 10^{-2}$; $c = -5,5 \cdot 10^{-4}$; $d = -4,3 \cdot 10^{-6}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O número de amostras que pode ser preparado foi diferente para cada solo, devido às diferenças do intervalo de conteúdo de água entre solo seco e solo saturado (θ_s) (Tabela 1). O θ_s aumentou na seqüência Argissolo-A ($0,44m^3 m^{-3}$), Argissolo-B ($0,45m^3 m^{-3}$) e Latossolo-A ($0,58m^3 m^{-3}$), na mesma seqüência do aumento no teor de argila (0,13, 0,23, e, 0,64kg kg^{-1} , respectivamente).

Na amostra de solo seco em estufa a $105^\circ C$ por 24h do Latossolo-A, o sinal de reflexão do pulso elétrico não teve resolução suficiente para a medição da K_a pelo TDR100. Excluindo-se essa amostra, a K_a média ficou em torno de 3,5 para todos os solos na condição de mínimo θ , mas, na saturação, ela foi bem diferente entre os solos (27,39 no Argissolo-A; 35,60 no Argissolo-B e 42,50 no Latossolo-A) devido às diferenças no θ_s (Tabela 1).

No Latossolo-A, o desvio padrão da K_a foi pouco alterado em toda a faixa de θ (Tabela 1). Diferentemente, no Argissolo-A e no Argissolo-B, houve aumento do desvio padrão da K_a com o aumento de θ , indicando aumento da variabilidade de K_a por efeito do comprimento dos cabos.

A equação (1) ajustou-se bem aos dados medidos, pois o R^2 foi maior que 0,97 para todos os

Tabela 1 - Médias e desvio padrão da constante dielétrica (K_a) para cada conteúdo de água (θ) da série de amostras de cada solo.

-----Argissolo-A ⁽¹⁾ -----		-----Argissolo-Bt ⁽¹⁾ -----		-----Latossolo-A ⁽²⁾ -----	
$\theta, m^3 m^{-3}$	K_a	$\theta, m^3 m^{-3}$	K_a	$\theta, m^3 m^{-3}$	K_a
0,00	3,75 (0,19)	0,00	3,34 (0,07)	0,01	3,85 (0,01)
0,02	4,03 (0,24)	0,04	4,8 (0,35)	0,12	5,35 (0,02)
0,05	4,54 (0,11)	0,09	5,68 (0,19)	0,13	6,25 (0,03)
0,10	6,94 (0,17)	0,11	5,96 (0,17)	0,17	6,95 (0,03)
0,17	12,20 (0,37)	0,14	6,46 (0,17)	0,21	8,39 (0,01)
0,22	15,83 (0,58)	0,15	8,24 (0,22)	0,22	10,50 (0,04)
0,26	17,92 (0,36)	0,17	10,37 (0,33)	0,27	13,88 (0,04)
0,31	20,74 (0,73)	0,24	12,89 (0,49)	0,31	17,30 (0,05)
0,44	27,39 (1,01)	0,30	16,72 (0,82)	0,34	21,39 (0,05)
1,00	83,56 (1,27)	0,45	35,60 (1,81)	0,39	27,19 (0,3)
-	-	1,00	84,78 (1,31)	0,41	33,54 (0,09)
-	-	-	-	0,45	35,54 (0,12)
-	-	-	-	0,47	35,17 (0,25)
-	-	-	-	0,58	42,50 (0,23)
-	-	-	-	1,00	80,94 (0,03)

⁽¹⁾As medidas de K_a foram feitas com cabos coaxiais 500Ohm de 3, 10 e 25m. ⁽²⁾As medidas de K_a foram feitas somente com cabos coaxiais 500Ohm de 3m. Números entre parênteses representam o desvio padrão.

ajustes. Porém, em seis dos 14 ajustes (Argissolo-A-3-c, Argissolo-A-10-c, Argissolo-A-25-c, Argissolo-Bt-3-c, Argissolo-Bt-10-c e Argissolo-Bt-25-c), um ou mais parâmetros de ajuste não tiveram efeito significativo no modelo (Tabela 2). Apesar disso, optou-se pela manutenção de todos os parâmetros da equação (1), o que proporcionava aumento do coeficiente de determinação R^2 , indicando melhoria na estimativa do modelo. Outro motivo foi a decisão de se obter equações com todos os termos até o terceiro grau, para compará-las com a equação sugerida por TOPP et al. (1980), que também tem todos os termos até o terceiro grau.

Com a inclusão das medidas de K_a em água, as equações obtidas geraram curvas que acompanharam a tendência da curva definida pela equação de TOPP et al. (1980) em toda a faixa de K_a (Figura 1). Diferentemente, sem a inclusão das medidas de K_a em água, as equações geraram curvas que iniciaram desvio expressivo em relação à curva definida pela equação de TOPP et al. (1980), a partir de valores de K_a em torno de 30 (Figura 1), que são menores que os K_a medidos em solo saturado para o Argissolo-B e Latossolo-A (Tabela 1).

A inclusão de medidas de K_a em água é aconselhável, mesmo para curvas de uso restrito ao solo para o qual ela é elaborada. Caso as medidas da K_a em solo próximo à saturação no campo forem maiores que a K_a da amostra saturada da qual se obteve a curva de calibração, o uso da curva de calibração sem a condição de contorno pode resultar superestimativa (Figuras 1b e 1f) ou subestimativa (Figura 1d) do conteúdo de água no solo. Essas

diferenças podem aumentar bruscamente a partir de $K_a = 27$ no Argissolo-A, $K_a = 37$ no Argissolo-Bt e $K_a = 40$ no Latossolo-A (Figura 2), que são quase todos menores que os valores de K_a medidos nas amostras saturadas (Tabela 1).

Para os três solos usados na calibração, o erro no conteúdo de água estimado, incluindo possíveis efeitos do comprimento de cabo e da obtenção de curvas de calibração sem a inclusão de medidas de K_a em água, pode ser maior que $0,1\text{m}^3\text{m}^{-3}$, se o TDR100 medir, no campo, K_a com 5 unidades a mais que a K_a medida no solo saturado no laboratório (Figura 2). Isso pode acontecer se o solo no campo onde a sonda de TDR é inserida estiver saturado e sua porosidade total for maior que a porosidade total da amostra usada na calibração. Tendo em vista que a condição de solo saturado não é a mais frequente no campo, a ocorrência e a magnitude desses erros podem ser pequenas. Para que elas sejam quantificadas, é necessário uma análise de séries de medições de campo.

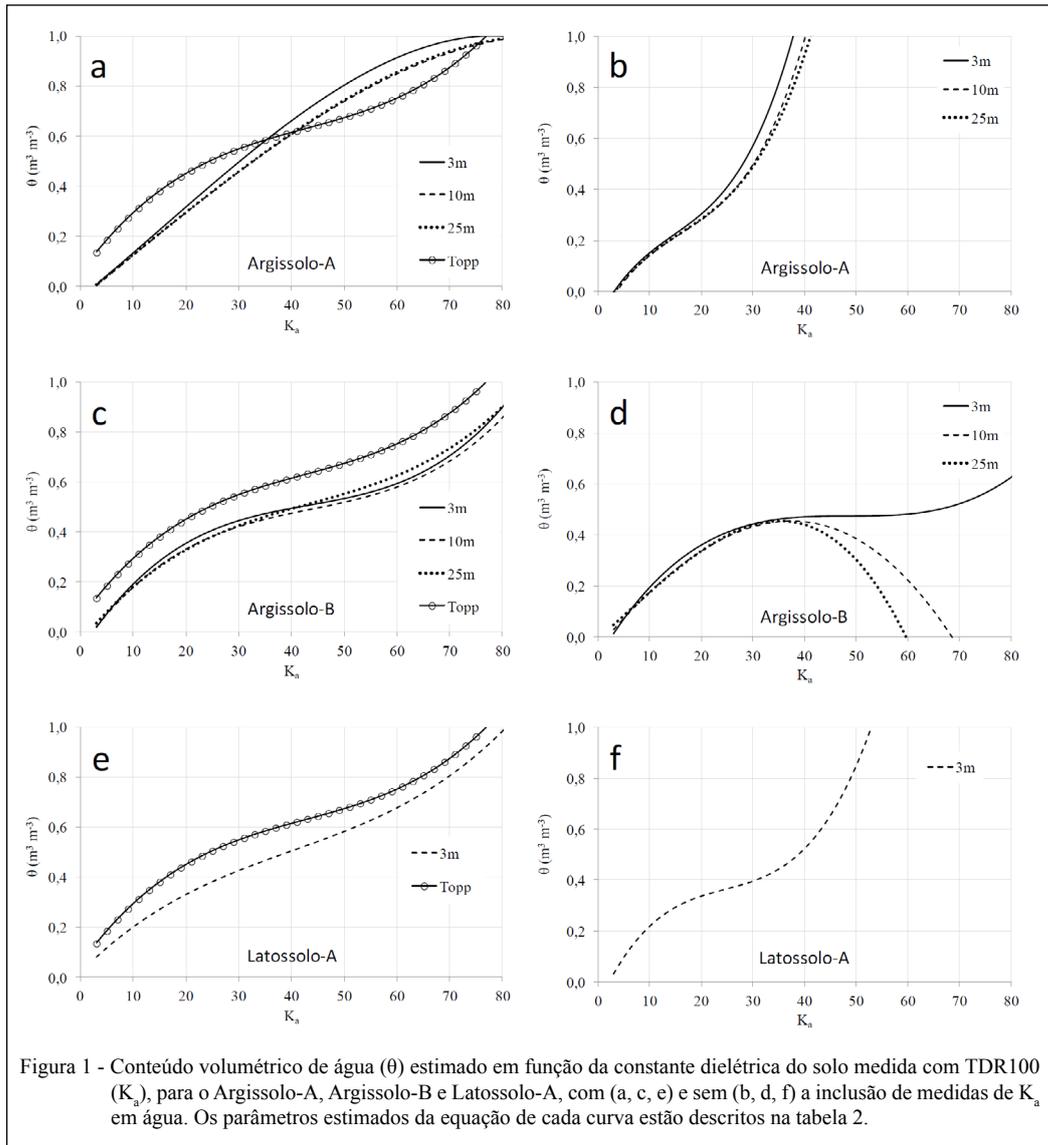
O uso de curva de calibração sem condição de contorno (sem medidas de K_a em água) requer maior atenção com as estimativas do θ em solo próximo da saturação e aumenta a chance de necessidade de correção da curva de calibração, procedimento recomendado por SERRARENS et al. (2000) e STANGL et al. (2009). Portanto, a validade da curva é restrita para o intervalo de K_a medidos no campo, que permanecem dentro do intervalo de K_a usados na curva de calibração.

Cabe ressaltar que o uso de curva de calibração, incluindo medidas de K_a em água não

Tabela 2 - Valores estimados dos parâmetros da equação (1) ajustada com e sem condição de contorno para as diferentes combinações de solo e comprimentos de cabo.

Combinação ⁽¹⁾	a	b	c	d	R^2
Argissolo-A-3-c	-4,4430E-02	1,7360E-02	0,68780E-04	-1,5300E-06	0,9982
Argissolo-A-10-c	-5,1720E-02	1,7540E-02	288,00E-04	-0,74665E-06	0,9977
Argissolo-A-25-c	-4,1930E-02	1,6830E-02	22,350E-04	-0,89448E-06	0,9978
Argissolo-A-3-s	-10,484E-02	3,7810E-02	-16,000E-04	36,290E-06	0,9970
Argissolo-A-10-s	-11,916E-02	3,8660E-02	-15,900E-04	32,880E-06	0,9955
Argissolo-A-25-s	-9,8970E-02	3,4860E-02	-13,400E-04	27,720E-06	0,9946
Argissolo-Bt-3-c	-7,4950E-02	3,2770E-02	-6,6973E-04	5,1500E-06	0,9934
Argissolo-Bt-10-c	-6,2420E-02	2,9470E-02	-5,7684E-04	4,4000E-06	0,9955
Argissolo-Bt-25-c	-4,0200E-02	2,6360E-02	-4,6996E-04	3,5900E-06	0,9948
Argissolo-Bt-3-s	-8,4260E-02	3,4450E-02	-7,0863E-04	4,8600E-06	0,9834
Argissolo-Bt-10-s	-4,1160E-02	2,4160E-02	-2,2727E-04	-1,6900E-06	0,9831
Argissolo-Bt-25-s	-0,65100E-02	1,7920E-02	0,97120E-04	-6,6200E-06	0,9817
Latossolo-A-3-c	1,9170E-02	2,1250E-02	-3,4048E-04	2,8200E-06	0,9776
Latossolo-A-3-s	-8,6740E-02	4,4300E-02	-15,800E-04	21,360E-06	0,9874

(1) A sequência de informações representa o solo (Argissolo e Latossolo), o horizonte (A e Bt), o comprimento do cabo (3, 10 e 25m) e a condição de ajuste da equação (1) com (c) e sem (s) as medidas de K_a em água.



dispensa a verificação de campo, nem garante que a curva obtida com a equação (1) será concordante com a de TOOP et al. (1980), fato observado neste estudo (Figura 1) e já conhecido de estudos anteriores (TOMAZELLI & BACCHI, 2001; COELHO et al., 2006; ELAIUY et al. 2009; KAISER et al., 2010; SANTOS et al., 2010).

Contudo, neste estudo, ela preveniu erros de magnitude maior que as diferenças causadas pela mudança no comprimento dos cabos, que foram, no máximo, de $0,035 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Argissolo-A), quando comparados os cabos de 3m e 25m. Além de prevenir erros de magnitude considerável, o uso da condição de contorno, por evitar desvios bruscos, confere mais chances de

a curva obtida ser utilizada em solos semelhantes ao usado na calibração.

CONCLUSÃO

O uso de curvas de calibração do TDR100, obtidas em laboratório, só é confiável para valores de K_a medidos no campo, restritos ao intervalo de K_a usados na elaboração da curva de calibração. A inclusão de medidas de constante dielétrica em água para elaboração da curva de calibração aumenta a acurácia da estimativa do conteúdo de água no campo. Sem esse procedimento e sem verificação de campo das medidas de K_a , erros na estimativa de θ da ordem de $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ podem ocorrer facilmente.

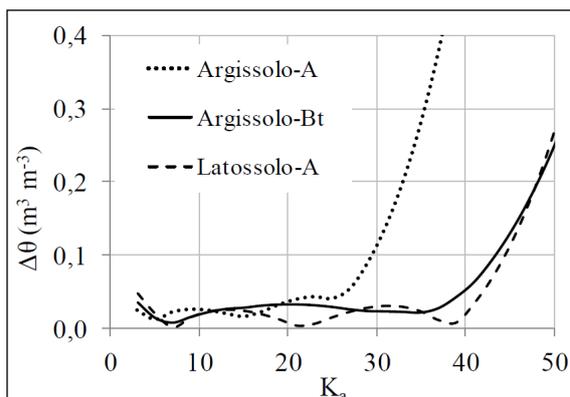


Figura 2- Diferenças absolutas no conteúdo volumétrico de água ($\Delta\theta$) estimado por curvas de calibração com e sem medidas de K_a em água. O $\Delta\theta$ foi calculado sem discriminar separadamente o comprimento dos cabos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro (Edital MCT/CNPq nº014/2010 - Universal).

REFERÊNCIAS

- COELHO, E.F. et al. 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**, v.30, n.1, p.23-30, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832006000100003&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 13 maio 2014. doi:10.1590/S0100-06832006000100003.
- COELHO, E.F. et al. Sonda de TDR para estimativa da umidade e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, p.475-480, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662005000400006&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 13 maio 2014. doi: 110.1590/S1415-43662005000400006.
- ELAIUY, M. et al. Desenvolvimento e avaliação de sonda de TDR para o manejo racional da água em substratos utilizados na produção de mudas florestais. **Revista Ambiente & Água**, v.4, n.1, p.117-131, 2009. Disponível em: <<http://www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/188>>. Acesso em: 13 maio 2014. doi: 10.4136/1980-993X.
- JONES, S.B. et al. Time domain reflectometry measurement principles and applications. **Hydrological Processes**, v.16, n.1, p.141-153, 2002. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.513/abstract>>. Acesso em: 13 maio 2014. doi: 10.1002/hyp.513.
- KAISER, D.R. et al. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.3, p.649-658, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010006832010000300006&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em: 13 maio 2014. doi:10.1590/S0100-06832010000300006.
- SANTOS, M.R. et al. Influência do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas de TDR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.2, p.299-308, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832010000200003&script=sci_arttext>. Acesso em: 13 maio 2014. doi: 10.1590/S0100-06832010000200003.
- SERRARENS, D. et al. Soil moisture calibration of TDR level probes. **Scientia Agrícola**, v.57, n.2, p.349-354, 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162000000200024&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em: 13 maio 2014. doi:10.1590/S0103-90162000000200024.
- STANGL, R. et al. Field use and calibration of a TDR-based probe for monitoring water content in a high-clay landslide soil in Austria. **Geoderma**, v.150, n.1-2, p.23-31, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706109000020>>. Acesso em: 13 maio 2014. doi:10.1016/j.jbr.2011.03.031.
- TOMMASELLI, J.T.G.; BACCHI, O.O.S. Calibração de um equipamento de TDR para medida da umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.9, p.1145-1154, 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-204X2001000900008&script=sci_arttext>. Acesso em: 13 maio 2014. doi:10.1590/S0100-204X2001000900008.
- TOPP, G.C. et al. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v.16, n.3, p.547-582, 1980. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/WR016i003p00574/abstract>>. Acesso em: 13 maio 2014. doi: 10.1029/WR016i003p00574.