

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ”**

RELATÓRIO FINAL DE BOLSA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

**INFLUÊNCIAS DAS CARACTERÍSTICAS TEXTURAIS DO SOLO NA
CALIBRAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE TDR PARA DETERMINAÇÃO DE
UMIDADE**

**HENRY FRANZ MONTAN
PROF. JOSÉ PAULO MOLIN**

PIRACICABA, 2006

Resumo

Dentre os métodos de determinação da umidade do solo, a técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR), fundamentada na relação entre a umidade do solo e sua constante dielétrica, vem recebendo significativo enfoque por permitir a mensuração em tempo real e a possibilidade de leituras automatizadas, desejáveis para aplicações em agricultura de precisão. No entanto sua utilização é restringida pela necessidade de calibração, pois sabe-se que as características texturais do solo podem provocar significativas influências nas medições do TDR, pois interferem na constante dielétrica do solo. O objetivo desse trabalho foi analisar o comportamento de um equipamento portátil de TDR considerando as características texturais do solo. Com a realização de ensaios comparando as leituras obtidas pelo equipamento de TDR com determinações de umidade pelo método padrão de estufa, esperou-se obter uma equação que relacionasse as leituras do TDR e os parâmetros de textura do solo com a umidade. O trabalho foi desenvolvido no próprio campus da USP-ESALQ, local em que foram utilizadas, para o procedimento de calibração, cinco parcelas de solo com diferentes características texturais, e um experimento em condições controladas. O aparelho que foi utilizado pertence ao Projeto AP, do Departamento de Engenharia Rural da USP-ESALQ. Em cada uma das parcelas, foram realizadas três determinações de umidade com cada método, uma em cada condição de umidade esperada, ou seja, uma com solo seco, uma com solo em condições médias de umidade e uma com o solo próximo da capacidade de campo. No experimento em condições controladas elevou-se a umidade das amostras a condição de campo e monitorou-se sua umidade através dos dois métodos até sua estabilização. Os resultados foram avaliados por meio de uma análise estatística de regressão.

Introdução

Segundo Chaves (1991) a taxa de assimilação de CO₂ nas folhas das plantas é deprimida sob deficiência moderada de água, primordialmente como consequência do fechamento de estômatos. Em consequência desses decréscimos na assimilação de CO₂ e levando-se em conta a importância desses assimilados às plantas, e conseqüentemente ao rendimento agrônomico e econômico da cultura, estabelece-se a importância tecnoeconômica da água, e dos sistemas de irrigação, às culturas.

Frizzone & Botrel (1996), apud Lima (2003), afirmam que a eficácia da irrigação se identifica pela relação custo-benefício e cuja maximização é função de uma série de fatores que vão desde as condições de mercado para os produtos agrícolas, até as características de desempenho dos emissores de água. Dentre esses fatores está o uso quantitativo da água de

forma racional. Nesse contexto, a monitoração da quantidade de água disponível no solo às culturas mostra-se essencial, vindo a exigir métodos e instrumentos de determinação de umidade cada vez mais eficientes (Garzella, 2004).

Jensen et al. (2000), apud Garzella (2004), afirmam que nos últimos vinte anos, o potencial para se melhorar o manejo da irrigação aumentou substancialmente devido, entre outros fatores, principalmente à disponibilidade comercial de instrumentos de medição da umidade do solo para determinação de quando e quanto irrigar.

Silva (1998) descreve que um método ideal seria aquele que utilizasse uma propriedade física do solo altamente correlacionada ao seu teor de água. Essa propriedade deveria ser confiável e capaz de ser avaliada diretamente no campo, sem alterações das características físicas do solo. Davis e Chudobiak (1975) sugerem que a constante dielétrica do solo poderia ser utilizada para esse fim, introduzindo a técnica da reflectometria no domínio do tempo (Time Domain Reflectometry – TDR).

Atualmente, a técnica do TDR tem sido objeto de inúmeros estudos visando sua utilização para determinação do teor de água no solo, tendo em vista suas características desejáveis, dentre as quais destacam-se a mensuração em tempo real, a possibilidade de leituras automatizadas e de integração com sistemas de controle de irrigação (CICHOTA e LIER, 2002), e a aplicação em agricultura de precisão (GARZELLA, 2004).

A técnica do TDR consiste em medir a velocidade (razão entre o deslocamento de um corpo ou ponto material e o tempo despendido para realizar esse deslocamento) de propagação de um pulso eletromagnético e, através desse valor, estimar a constante dielétrica do material circundante, no caso o solo. A constante dielétrica é um parâmetro que apresenta correlação com o conteúdo de água no solo e para estima-lo o aparelho utilizado emite um pulso de voltagem através de uma haste metálica. Esse pulso irá se propagar através da haste e, ao encontrar o estrangulamento eletrônico, causado pela mudança de impedância no final da haste, provocará a emissão de um pulso ressoante, que percorrerá o caminho inverso do percorrido pelo pulso emitido pelo aparelho, até o começo da haste. O aparelho mede o tempo transcorrido entre a emissão do pulso de voltagem e a recepção do pulso ressoante. O comprimento L da haste é conhecido, e através destes dois valores calcula a velocidade de deslocamento deste pulso através da haste. A equação (1) expressa a relação citada.

$$v = \frac{2 \times L}{t} \quad (1)$$

onde:

v é a velocidade do pulso (m.s⁻¹)

L é o comprimento da haste (m)

t é o tempo (s)

Pela teoria do magnetismo, sabe-se que a velocidade de um pulso eletromagnético em um meio condutor é dada pela razão entre a velocidade da luz no vácuo e a raiz quadrada da constante dielétrica do material circundante. A equação (2) expressa a relação citada.

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (2)$$

onde:

v é a velocidade do pulso (m.s⁻¹)

c é a velocidade da luz no vácuo (3.108 m.s⁻¹)

k é a permissividade relativa ou constante dielétrica

A equação (2) permite concluir que a constante dielétrica, parâmetro resultante das interações eletromagnéticas entre o pulso e o meio condutor, vai influenciar negativamente a velocidade de propagação do pulso, ou seja, com o aumento da constante dielétrica ocorre a diminuição da velocidade de propagação do pulso.

Substituindo-se o parâmetro velocidade da equação (1) pela razão expressa pela equação (2), tem-se:

$$k = \left(\frac{t \times c}{2 \times L} \right)^2 \quad (3)$$

A constante dielétrica da água é significativamente maior que a constante dielétrica aparente do solo, que corresponde à interação entre as constantes dielétricas de todos os seus constituintes, como pode ser observado na tabela 1.

Tabela 1. Constante dielétrica de alguns constituintes do solo

Material	Constante dielétrica
Ar	1
Água (20°C)	80
Gelo (-3°C)	3
Basalto	12
Granito	7-9
Silte seco	3,5
Areia seca	2,5

Fonte: Curtis e Defandorf (1929) *apud* Garzella (2004)

No entanto, a equação de TOPP et al. (1980), utilizada para estimar o conteúdo de água no solo, apresenta uma relação entre umidade e constante dielétrica aparente do solo demasiado generalista, que poderia ser utilizada para uma ampla diversidade de solos, desconsiderando-se praticamente toda a influência pertinente aos demais componentes do solo que concorrem para a constante dielétrica aparente, tais como sais, textura e densidade. É consenso entre

pesquisadores do assunto (SILVA, 1998; CICHOTA, 2003; TOMMASELLI, 1997, entre outros) que a relação proposta por TOPP et al. (1980) não possui aplicabilidade universal, uma vez que alguns atributos do solo podem conferir erros às medições. Por exemplo, em solos tropicais, o elevado teor de óxido de ferro frequentemente constitui-se como fonte significativa de erros (TOMMASELLI, 1997).

CICHOTA e LIER (2002) e SILVA (1998) afirmam ser fundamental a execução de um procedimento de verificação e ajuste da relação proposta por TOPP et al. (1980) para condições locais de solo, a fim de se obter resultados confiáveis.

Com base nesses aspectos o objetivo desse trabalho foi realizar o procedimento de análise de um equipamento de TDR levando em consideração as características texturais das amostras e suas influências nas aferições, na esperança de obter uma equação que, através dos parâmetros texturais, realize o ajuste das leituras, eliminando a necessidade do procedimento de calibração.

Materiais e métodos

Foram realizados dois experimentos, sendo que o primeiro foi conduzido em cinco parcelas que apresentavam gradiente textural, localizadas na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo, em Piracicaba, SP. O segundo experimento foi conduzido em condições controladas, em vasos.

Utilizou-se um equipamento de TDR portátil, modelo TDR 300 (Spectrum Technologies, Inc., Plainfield, Illinois, USA), que se caracteriza por utilizar como unidade o conteúdo volumétrico de água (Figura 1). Utiliza como fonte de energia quatro pilhas alcalinas do tipo AAA e pesa aproximadamente 1,4 kg; apresenta uma porta serial para comunicação e alimentação de sinal de GPS e tem capacidade de armazenar até 3250 leituras não georreferenciadas e 1350 leituras georreferenciadas; apresenta uma tela LCD de dezesseis caracteres e duas linhas. Existem dois tamanhos de haste, uma de 0,12 m e outra de 0,20 m de comprimento, ambas com diâmetro de 0,05 m . A transferência dos dados se dá por um cabo que conecta a sua porta serial à do computador.

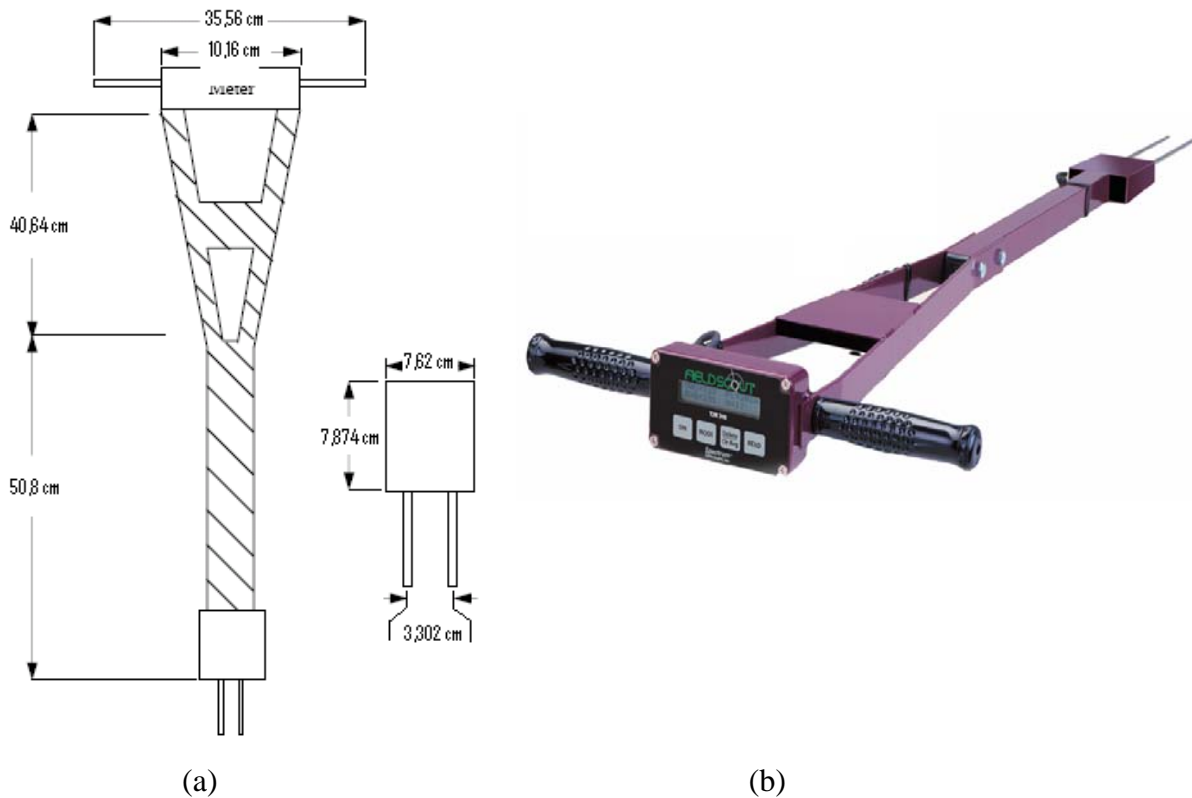


Figura 1. Equipamento de TDR utilizado nos experimentos (a) e suas dimensões (b)

O experimento em parcelas consistiu na coleta de três amostras deformadas de solo para determinação da umidade via método gravimétrico em estufa, a 105°C, e vinte leituras com o aparelho para cada parcela e em três condições de umidade esperada. Visou-se ter uma leitura com solo seco, uma com solo em condições médias de umidade e uma com o solo próximo da capacidade de campo, essas condições foram encontradas respectivamente nos dias 15 de Setembro de 2006, 09 de Agosto de 2006 e 22 de Setembro de 2006. As parcelas eram de formato retangular, apresentando 2 por 5 m, e com as características texturais apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características texturais da parcelas experimentais

Parcela	Argila (%)	Silte (%)	Argila (%)
1	32,68	21,06	46,26
2	13,64	37,39	48,97
3	22,87	21,05	56,08
4	30,82	13,17	56,01
5	10,25	9,09	80,66

No outro experimento, três vasos continham areia de textura fina e três continham solo argiloso, com 38,29 % de argila, 20,90% de silte e 40,81 % de areia. A análise granulométrica da areia é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Análise granulométrica da areia utilizada nos vasos

Malha (mm)	2	1	0,5	0,25	0,125	0,053	Fundo	Total
%	0,16	0,42	2,71	21,23	70,2	5,03	0,26	100

Foram realizadas cinco leituras com o aparelho e coletada uma amostra deformada de solo para cada leitura, a intervalos regulares de dois dias. Previamente os vasos já haviam tido sua umidade elevada até próximo à capacidade de campo.

Os valores de umidade do equipamento de TDR correspondem à média obtida em vinte leituras e o valor de umidade obtido pelo método da estufa corresponde à média de três amostras. No experimento em vasos comparou-se o valor da média de cinco leituras do equipamento de TDR com o valor de umidade determinado através de uma amostra composta de três sub-amostras.

Resultados e discussão

Os valores obtidos nas parcelas, através dos dois métodos, podem ser observados na tabela 4.

Tabela 4. Valores de umidade obtidos através do método padrão de estufa e do TDR nas parcelas.

Data	Parcela	Umidade Via Método da Estufa	Umidade Via TDR300	Condição do Solo
09/08/2006	1	15.94282027	20.65	Normal
	2	15.09415202	18.75	
	3	14.62469781	19.35	
	4	12.92195399	18.85	
	5	6.568076408	7.95	
15/09/2006	1	11.35650713	15.15	Seco
	2	9.240175981	11.1	
	3	9.496606208	13.05	
13/09/2006	4	9.43360975	13.64516129	
	5	3.692152045	4.8	
22/09/2006	1	18.73315636	27.7	Capacidade de Campo
	2	16.91886791	26.5	
	3	16.7151836	29.35	
	4	13.93144019	26.45	
	5	8.813026118	13.8	

Os valores de umidade obtidos no experimento em condições controladas podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5. Dados obtidos no experimento em condições controladas através do método padrão de estufa e do TDR.

Data	Vaso	Umidade Via Método da Estufa	Umidade Via TDR300	Média Via Método Da Estufa	Média Via TDR300
07/11/2006	1	10.06462036	10.4	10.31823383	10.33333333
	2	11.42107773	11.4		
	3	9.4690034	9.2		
	4	28.04208065	35.2	28.47002545	37.2
	5	27.77577722	35.2		
	6	29.59221848	41.2		
09/11/2006	1	7.648235722	5.6	7.984798385	5.066666667
	2	9.361592586	6.6		
	3	6.944566846	3		
	4	25.53380783	23	25.36204877	23.53333333
	5	24.95376791	23.2		
	6	25.59857058	24.4		
11/11/2006	1	5.928817024	3	4.485058185	4.666666667
	2	1.868928042	6.6		
	3	5.657429488	4.4		
	4	21.91540653	21.4	22.09725804	19.93333333
	5	22.31058571	19.2		
	6	22.06578188	19.2		
13/11/2006	1	4.023500089	2	4.464136379	2.133333333
	2	5.308379413	3		
	3	4.060529634	1.4		
	4	19.37031484	16.8	18.13644858	15.13333333
	5	18.29419036	15		
	6	16.74484053	13.6		
15/11/2006	1	3.321450309	1.6	3.853222718	2.066666667
	2	4.726631393	2.6		
	3	3.511586453	2		
	4	20.75619005	15.2	19.81274002	13.66666667
	5	19.42454225	12.4		
	6	19.25748776	13.4		

Pelos dados observa-se o efeito na permissividade aparente do solo devido à sua textura, na qual estão presentes elementos que concorrem para a definição da sua constante dielétrica. Com o aumento da permissividade aparente do solo aumenta a influência sofrida pelo pulso eletromagnético que percorre a haste, aumentando o tempo transcorrido entre a emissão do pulso e a sua recepção ressoante, e conseqüentemente aumentando a umidade estimada pelo aparelho de TDR.

No experimento sob condições controladas esperava-se que o teor de umidade estimado pelo aparelho fosse maior do que o obtido pelo método da estufa, uma vez que o aparelho sofre influência não só da umidade, mas também dos elementos presentes na textura do solo. Esse resultado, provavelmente, se deve a desestruturação do solo nos vasos, por ocasião da retirada das amostras para determinação da umidade via método da estufa. Isso diminui a superfície de contato solo-haste, diminuindo a influência da permissividade relativa do solo sobre o pulso eletromagnético que percorre a haste e, conseqüentemente, diminuindo o teor de umidade estimado pelo aparelho de TDR. Tal fato não ocorreu na primeira mensuração do experimento pois a retirada das amostras para determinação da umidade via método da estufa foi feita após a leitura com o aparelho de TDR.

Com os valores de umidade obtidos pelo método da estufa e os valores estimados pelo aparelho de TDR foi construída uma curva de dispersão para o experimento em parcelas (Figura 2), e para o experimento em vasos (Figura 3).

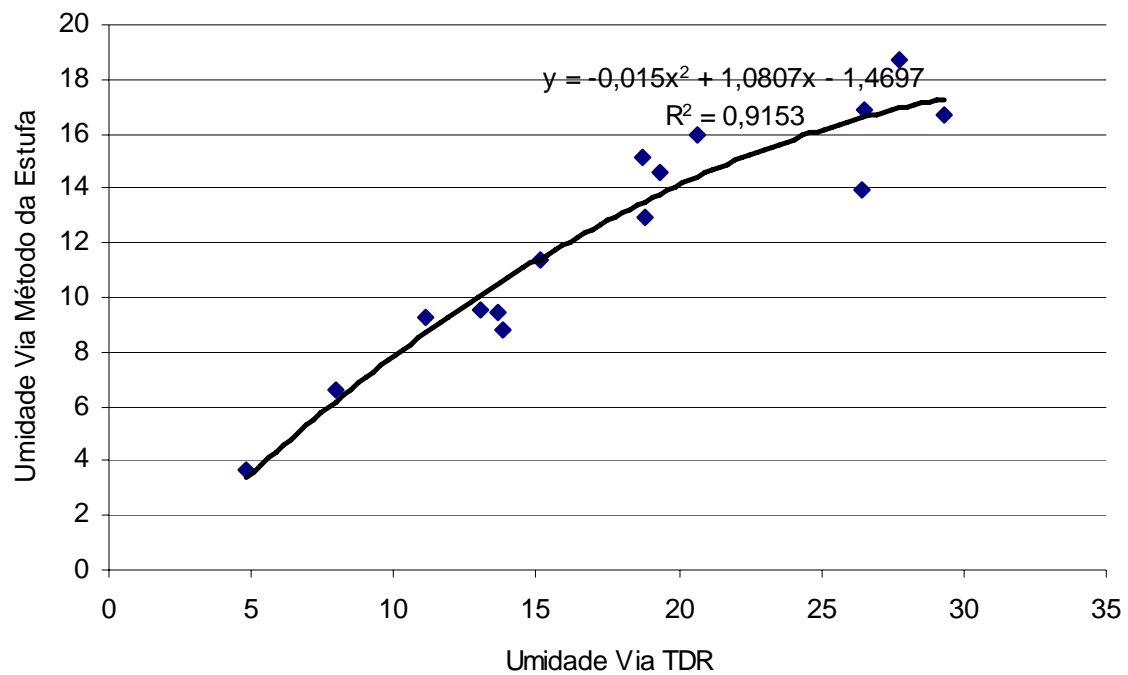


Figura 2. Curva de dispersão dos valores de umidade do solo medidos pelo TDR x umidade determinada pelo método da estufa, nas parcelas.

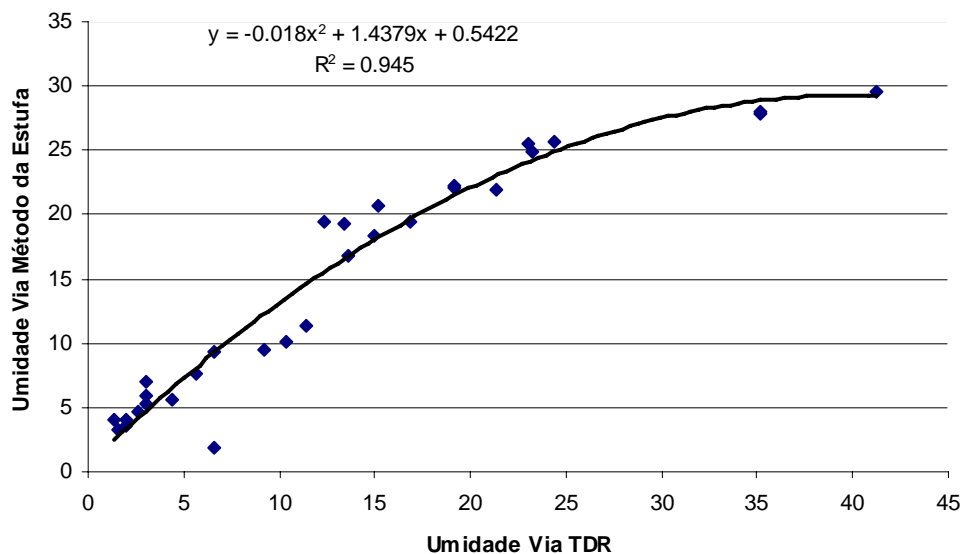


Figura 3. Curva de dispersão dos valores de umidade do solo medidos pelo TDR x umidade determinada pelo método da estufa, nos vasos.

Conclusão

Através dos resultados pode-se observar a significativa interferência que a textura exerce sobre os valores de umidade estimadas pelo TDR. Espera-se que esta limitação possa ser sanada através de uma equação de calibração, no entanto seria precipitado adotar as equações apresentadas neste trabalho devido a restrição no que se refere ao espectro textural abrangido pelas mesmas.

Referências bibliográficas

CHAVES, M.M. Effects of water deficits on carbon assimilation. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, **42**:1-16, 1991.

CICHOTA, R.; LIER, Q.J.V. Calibração no campo de um equipamento de TDR segmentado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. Anais...Cuiabá: SBCS/UFMT, 2002. 1CDROM.

DAVIS, J.L.; CHUDOBIAK, W.J. In-situ meter for measuring relative permittivity of soils. Geological Survey of Canada (Paper 75-1A), p.75-79, 1975.

GARZELLA, T.C.1; Molin, J.P. CALIBRAÇÃO EM CAMPO DE UM TDR PARA DETERMINAÇÃO DE UMIDADE. 2004. 14 p. – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP, 2004

LIMA, Sílvio C. R. V. et al . Performance curves of new and used pressure regulating valves. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 7, n. 2, 2003. Available from: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662003000200003&lng=en&nrm=iso>. Access on: 02 Nov 2006. doi: 10.1590/S1415-43662003000200003.

SILVA, E.L. Determinação automática do teor de água em latossolo roxo distrófico com uso de reflectometria de onda. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1998, Poços de Calda. Anais..Poços de Calda: SBEA, 1998.

TOMMASELLI, J.T.G. Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (Time Domain Reflectometry). 1997. 109 p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

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